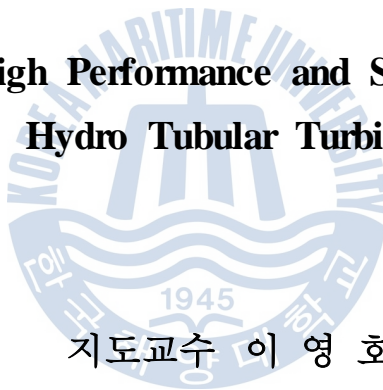


공학박사 학위논문

소수력 발전용 튜블러 수차의 고성능화 및  
현장최적화에 관한 연구

**A Study on High Performance and Site Optimization of  
Hydro Tubular Turbine**



지도교수 이 영 호

2012년 8월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

황 영 호

本 論文을 黃英鎬의 工學博士 學位論文으로 認准함.

위원장 : 공학박사 정 재 현



위 원 : 공학박사 박 권 하



위 원 : 공학박사 김 정 환



위 원 : 공학박사 최 영 도



위 원 : 공학박사 이 영 호



2012년 6월 22일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Abstract .....     | iii |
| Nomenclature ..... | vi  |

## 제 1 장 서 론

|                   |    |
|-------------------|----|
| 1.1 연구 배경 .....   | 1  |
| 1.2 연구의 필요성 ..... | 19 |
| 1.3 연구의 목적 .....  | 30 |

## 제 2 장 소수력 발전용 수차의 선정 및 검토

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 2.1 수차의 선정 .....                     | 32 |
| 2.2 소수력 발전용 수차의 기본 구조 .....          | 38 |
| 2.3 설치 조건에 따른 튜블러 수차의 설계 검토 .....    | 43 |
| 2.3.1 저낙차 조건( $H < 5m$ ) .....       | 51 |
| 2.3.2 중낙차 조건( $5m < H < 15m$ ) ..... | 57 |
| 2.3.3 고낙차 조건( $H > 15m$ ) .....      | 65 |
| 2.3.4 공통 설계 조건 .....                 | 75 |

## 제 3 장 수치해석

|                  |    |
|------------------|----|
| 3.1 수치해석기법 ..... | 76 |
| 3.2 계산격자 .....   | 78 |
| 3.3 지배방정식 .....  | 79 |
| 3.4 난류모델링 .....  | 80 |
| 3.5 수치해석결과 ..... | 83 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 제 4 장 해양배출수를 이용한 저낙차용 튜블러 수차의 성능특성    |     |
| 4.1 저낙차용 튜블러 수차의 운전 .....             | 89  |
| 4.2 수차의 성능 .....                      | 93  |
| 4.2.1 낙차 및 유량의 영향 .....               | 97  |
| 4.2.2 조수간만의 차에 따른 영향 .....            | 103 |
| 4.3 수차의 고성능화 .....                    | 105 |
| 제 5 장 수도시설물을 이용한 중낙차용 튜블러 수차의 성능특성    |     |
| 5.1 중낙차용 튜블러 수차의 운전 .....             | 107 |
| 5.2 수차의 성능 .....                      | 110 |
| 5.3 수차의 고성능화 .....                    | 123 |
| 제 6 장 폐수처리장배출수를 이용한 고낙차용 튜블러 수차의 성능특성 |     |
| 6.1 고낙차용 튜블러 수차의 운전 .....             | 125 |
| 6.2 수차의 성능 .....                      | 128 |
| 6.3 수차의 고성능화 .....                    | 132 |
| 제 7 장 튜블러 수차의 현장 최적화 .....            | 133 |
| 제 8 장 결 론 .....                       | 137 |
| 참 고 문 헌 .....                         | 141 |
| 감 사 의 글 .....                         | 145 |

# **A Study on High Performance and Site Optimization in Hydro Tubular Turbine**

**Yeong Ho, Hwang**

*Department of Mechanical Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University*

## **Abstract**

The world is now facing a serious energy problem. Mass consumption of fossils fuels such as oil and coal cause global warming and other environmental problems due to acid rain. To deal with this problem, hydropower should be the focus of the electric power generation systems, as clean and cool energy sources with the highest energy density. However, as any suitable type of turbine has not been determined yet for the range of small hydropower at this stage, we shall need further study of the most effective turbine type.

According to the recent study results related to the small hydropower development, wasted energy by pressure reducing valve at the end of the pipeline can be extracted by a small hydropower turbine.

The main concept of using the small hydropower turbine is based on using the different water pressure levels in pipe lines. A propeller type hydropower turbine,

which is called as tubular turbine, has been used in order to use this renewable differential pressure energy.

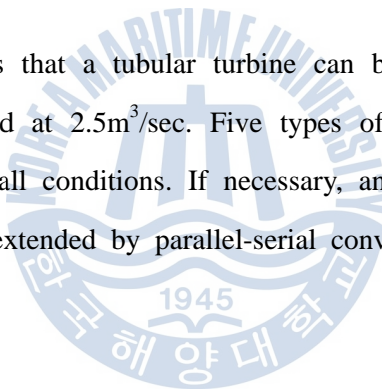
Conventionally, tubular turbines have been used in the range of relatively low head of below 20m. However, in order to widen the operating range of the turbine, the present study is focused on the developing a new design of tubular turbine which can be used in the head range of 1.5m~20m.

Moreover, this study aims to propose the optimum design of the tubular turbines using differential pressure in marine small hydro power plants, water supply systems, and wastewater hydro power plants. The reliability of the proposed design method can be acquired by theoretical analysis, CFD analysis and experimenting with tubular turbine models.

According to the present study, the results are obtained as follows.

- (1) Operational range of tubular turbine head using differential pressure in the water supply system can be extended to over 10m by the adoption of variable vane angle and number of turbine runners.
- (2) An optimum design method for the best turbine efficiency by changing an opening angle of the runner vane is inconsistent with those of CFD analysis for the tubular turbine efficiency.
- (3) Under 10m of the hydraulic head range, the optimum operational condition can be obtained by using 4 pieces of runner vane according to the present design method, and more than 10m of the hydraulic head range, using 5 pieces of runner vane is more efficient.

- (4) Application of servo motors for the variation of runner vane opening angle allows extension operational condition of the tubular turbine for the expected small hydropower resources.
- (5) It is found that a tubular turbine can be used for a low head under 1.5m as operating marine small hydro power plant. The tubular turbine efficiency under the hydraulic head of 19.5m from a wastewater hydro power plant is also verified.
- (6) This study shows that a tubular turbine can be used under the head from 1.5m to 20m and at  $2.5\text{m}^3/\text{sec}$ . Five types of the tubular turbines can be standardized for all conditions. If necessary, an operational range of tubular turbines can be extended by parallel-serial conversion.



## Nomenclature

$b$  : width of nozzle, runner and runner chamber [m]

$C$  : coefficient dependent upon the nozzle [ - ]

$C_p$  : pressure coefficient  $(=p - p_{ref}/2\rho gH)$  [ - ]

$d$  : diameter of runner [m]

$H$  : effective head [m]

$L$  : electrical load [kW]

$N$  : rotational speed [ $\text{min}^{-1}$ ]

$N_u$  : unit rotational speed  $(=N/H^{1/2})$  [ - ]

$N_{u0}$  : unit rotational speed under no load condition [ - ]

$P$  : output power [W]

$P_u$  : unit output power  $(=P/H^{3/2})$  [ - ]

$p$  : static pressure [Pa]

$p_{ref}$  : reference static pressure at draft tube outlet [Pa]





$Q$  : volume flow rate [m<sup>3</sup>/s]

$Q_u$  : unit volume flow rate ( $=Q/H^{1/2}$ ) [ - ]

$Q_{u0}$  : unit volume flow rate under no load condition [ - ]

$u$  : absolute velocity [m/s]

$v$  : fluid velocity [m/s]

$\eta$  : efficiency [ - ]

$\theta$  : runner vane angle [deg]

$\rho$  : density of working fluid [kg/m<sup>3</sup>]



# 제1장 서론

## 1.1 연구배경

물은 중력의 영향을 받아 높은 곳에서 낮은 곳을 향해서 흐른다. 그 흐름을 수로로 끌어 들여 수차발전기를 회전시켜 전기에너지를 발생시키는 것이 수력발전(hydropower generator)이다.

수력발전은 높은 위치에 있는 하천이나 저수지 물의 위치에너지인 낙차를 이용하여 수차에 회전력을 발생시키고 수차와 직결되어 있는 발전기에 의해서 전기에너지로 변환시키는 것을 말한다. 수차를 회전시키는 물의 유량이 많고, 낙차가 클수록 발전설비용량이 커지고 전력량도 그만큼 많아진다.

신재생에너지로서 수력은 2005년도 이전에는 설비용량 1만kW를 기준으로 소수력(small hydropower)과 수력(hydropower)으로 구분하였으나, 2005년도에 개정된 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 시행 규칙에서는 설비용량이 삭제되어 ‘물의 유동에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 설비’로 일원화되었다.

수력부문의 연구개발 및 보급대상은 주로 1만kW이하의 소수력발전을 대상으로 하고 있으며, 다양한 수력자원 조건에 적용할 수 있는 친환경 수력에너지의 개발, 발전설비의 설계 및 제작, 자동화 및 최적운영, 표준화 및 간소화 그리고 발전설비 현대화 등에 필요한 일체의 선진기술을 포함한다.<sup>[1]</sup>

소수력(SHP: small hydropower)은 곡식을 제분하기 위한 물레방아용으로 처음 이용되었지만 나중에는 조금 복잡한 수차(water wheel)가 출현하여 물레방아를 대신하여 사용하였다.

1827년 프랑스에서 수차의 발명은 현대 수력의 발전에 크게 기여하였으며, 1880년에 수력 터빈이 처음으로 대용량으로 전기를 생산하는데 사용되었다. 19세기 말에 유럽에서 개발된 터빈은 수차를 거의 완전하게 대체하게 되었다.

수력발전의 기본기술은 19세기에 확립된 것으로 소규모의 발전이 일반적이었기 때문에 기초 기술 이외에 특별한 기술이 요구되지 않았다. 이 기간 동안 오늘날과 같은 기본적인 터빈 기술이 출현하게 되었으며, 유럽과 북미 전역에 소형 터빈이 널리 보급되었다. 그 후 송전선로의 확장과 설비증가가 용이해져 수력발전을 이용한 전력 생산이 대형화 중심으로 전개 되었다. 이로 인해 1930

년대에서 1970년대 걸쳐 소수력 시스템과 대수력 설비가 새롭게 갖추어지게 되었다.

1973년 오일 위기는 소수력 자원의 개발에 대한 관심을 다시 점화시키는 계기가 되었고, 전력시장에는 새로운 터빈 제작자의 출현과 함께 산업의 부흥을 맞이하게 되었다. 1980년대와 1990년 초 낮은 원유 가격과 연이은 “dash for gas” 때문에 수력 시스템 개발에 대한 관심은 다시 낮아지게 되었다. 그러나 최근에는 전기산업의 개방에 따라 일부지역에서 독자적으로 전력을 생산하는 민간 발전사업자(IPP : Independent Power Producers)와 공공기관이 소수력 발전의 개발을 주도하고 있다.

신·재생에너지의 한 분야인 소수력은 자연적인 지역조건과 조화를 이루며 국내 부존 잠재량이 많고, 탄산가스 배출량이 가장 적어 범세계적인 환경규제에 적극적으로 대비하는 친환경 청정에너지원으로서 에너지 밀도가 높아 지역의 분산 전원에 기여할 수 있는 유용한 자원으로 재평가되고 있다.

최근 각국의 친환경 에너지 개발은 국제적인 환경요인에 부응한 기술적, 사회적, 환경적 효과의 높은 기대치로 인하여 가장 안정적인 기반기술이 확보되어 있는 소수력발전설비의 투자를 더욱 확대하고 있다. Fig.1.1은 전세계 총에너지 생산량 중에서 신재생에너지가 차지하는 비율을 보이고 있다. 그림에서 보이는 것과 같이 신재생에너지의 비율은 점점 더 높아져 가고 있으며, 비례하여 화석연료에 대한 제약 역시 같이 높아져 가게 될 것이다. Fig.1.2는 2011년 국가 에너지 통계종합정보시스템 자료에 근거하여 전 세계 수력발전 누적량이 해마다 증가하고 있는 추세를 보이고 있다. 또한 Fig.1.3은 같은 정보 시스템에서 국내 수력발전 누적량에 대한 조사자료를 보이고 있으며, 최근 수력 발전량이 주춤하고 있는 경향을 보이고 있으나 일본내 수력의 활성화등과 맞물려 곧 회복하게 될 것으로 예측된다.

우리나라는 연평균강수량이 1,245mm로서 강수량이 풍부하고 전국토의 ⅔가 산지로 구성되어 있는 지형에 맞는 치수사업으로 댐이나 저수지를 건설하여 생·공용수, 관개용수, 하천 유지용수, 수력발전 등으로 이용하고 있으며 일반하천의 낙차 이용, 다목적댐 및 양수발전소의 수위 조절을 위한 낙차이용, 농업용 저수지의 낙차 이용, 하수종말처리장의 방류수 이용, 수도 관로의 관압 이용, 화력발전소의 온배수 이용, 양어장의 순환수 이용, 공장의 냉각수 이용, 방조제 수문 이용 등 각 지역에 산재한 미활용 소수력 자원이 많이 부존(賦存)하고 있다.

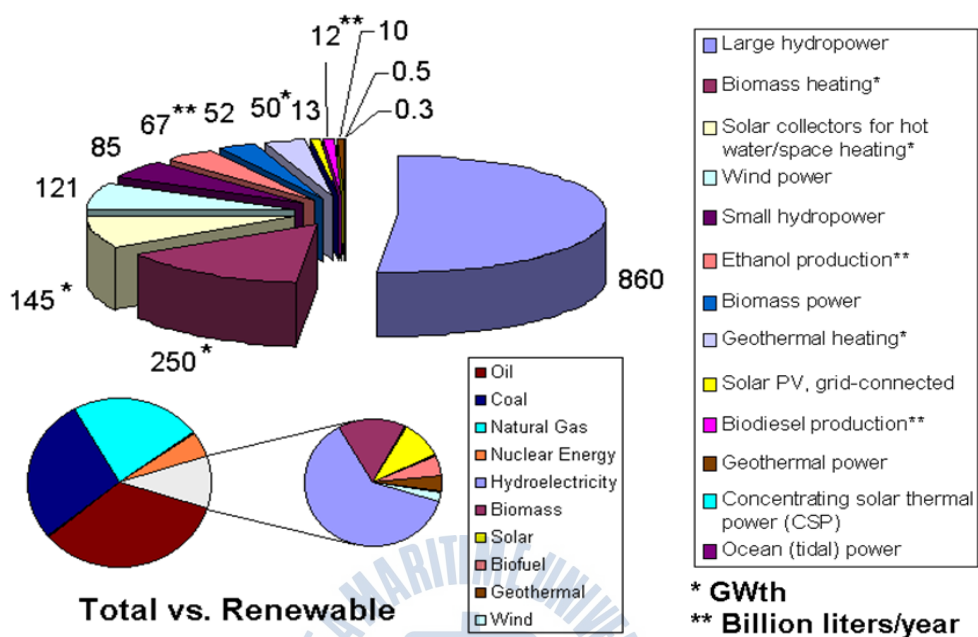
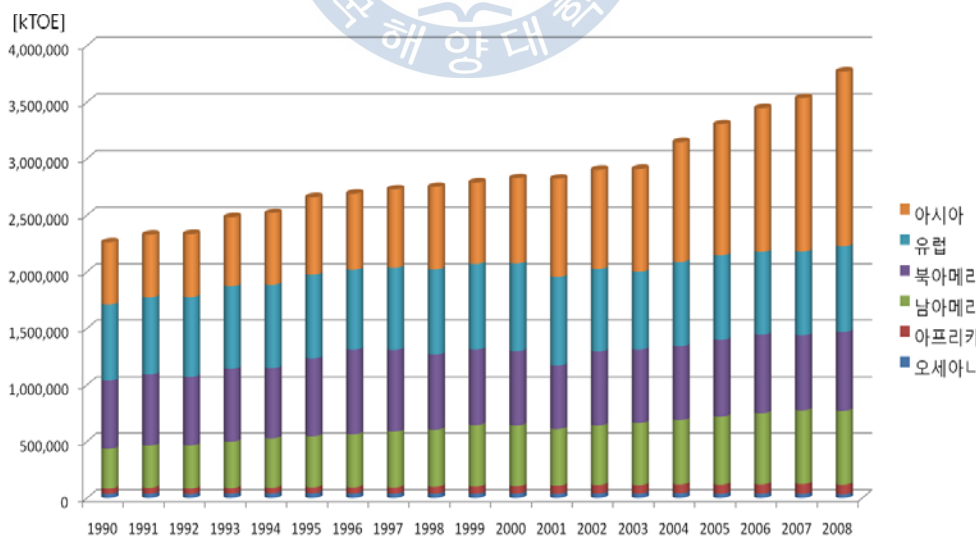


Fig.1.1 Supply ratio of renewable energy in total energy (2010. Survey of energy resources world energy council)



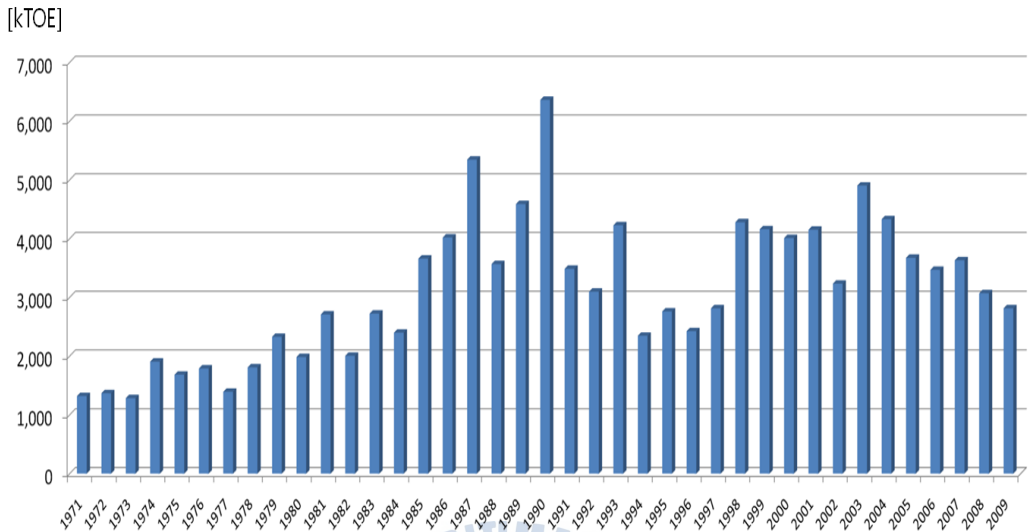


Fig.1.3 Accumulation domestic hydropower  
(Korea energy statistics information system, 2011)

소수력발전의 이용은 국내 재생에너지 자원을 활용하여 전력을 생산할 수 있을 뿐만 아니라 청정에너지원의 개발을 통하여 지역개발을 촉진하고, 이로 인한 경제적 파급효과도 매우 큰 것으로 알려져 있다. 소수력발전은 고전적인 기술임에도 불구하고 IT기술과 친환경 기술을 접목한 순수 국내기술로도 확립이 가능한 기술이며, 계획, 설계 및 건설기간이 빠른 편이다.<sup>[2]</sup>

수력에너지는 우리나라의 에너지 정책 현실에서 전력생산량의 1.4%, 발전설비 구성별 용량의 8.4%에 불과하지만 다음과 같은 이유로 에너지원으로서 중요한 역할을 해왔다.

우선 공급 안정성이 매우 우수하며, 발전가격이 장기적으로 안정적이며 싸다는 장점을 가지고 있는 수력에너지는 기술 숙련도가 높은 석유의 대체에너지로서 지속적으로 개발할 가치가 있다. 또한, 수력은 재생 가능하며 순국산 에너지이고, 에너지 안정성에 기여함과 동시에 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 배출하지 않는 깨끗한 에너지로 지구온난화 방지에 공헌하고 있어 개발의 필요성이 점점 높아지고 있다.

## (1) 수력발전의 필요성

수력발전의 특징을 정리해 보면 다음과 같이 나열할 수 있다.

### ① 청정에너지(clean energy)

수력발전은 운전 중에 질소 산화물(NOx), 유황산화물(SOx)을 배출하지 않을 뿐만 아니라 Table 1.1에서 보는 바와 같이 이산화탄소 배출량도 석유나 석탄 등의 다른 에너지원에 비해 매우 적은 청정에너지로 지구 온난화 방지 관점에서 가장 적합한 에너지중의 하나이다.

Table 1.1 CO<sub>2</sub> Emissions per 1kWh<sup>[3]</sup>

| 구 분   | 1kWh당 CO <sub>2</sub> 배출량[g-CO <sub>2</sub> /kWh] |
|-------|---|
| 석탄화력  | 975.2   |
| 석유화력  | 742.1   |
| LNG화력 | 607.6   |
| LNG   | 518.8   |
| 원자력   | 28.4  |
| 태양광   | 53.4  |
| 풍력    | 29.5  |
| 지열    | 15.0  |
| 수력    | 11.3  |

### ② 순국산 에너지

국내 전체 전력 생산량 중 수력발전이 차지하는 비율은 1.4%에 불과하지만, 해외 수입에 의존하지 않는 순국산 에너지이다.

### ③ 전력공급량 조정기능

수력은 3~5분의 짧은 시간에 발전이 가능하기 때문에 전력수요의 변화에 가장 민첩하게 대응할 수 있는 특징이 있다. 따라서 유입식은 기저(基底) 전력 공급용으로 사용하고 조정지식, 저수지식, 양수식은 첨두(peak)부하 공급용으로 사용이 가능하다.

### ④ 발전단가의 장기 안정성

수력발전의 원가 구성은 자본비가 대부분이라서 인플레이션이나 연료 가격 변동이 거의 없으므로 타 전원에 비교하여 발전 단가는 싸고 장기적으로 안정되어 있다.

⑤ 에너지 변환효율이 높음

열효율이 최고 40~50% 정도인 화력발전에 비교하여 수력발전은 수차발전효율이 80~90%정도로 약 2배가 될 만큼 에너지 변환효율이 높다.

⑥ 지역에너지 공급

향후 개발이 예상되고 있는 소수력발전소의 적지는 산간지대에 위치하기 때문에 전력계통 운용상에서 외딴 지역의 에너지 수요에 대처하는 전원으로로서의 기능을 할 수 있다. 또한 자연재해 등의 발생시에 필요 최소전원으로 사용될 수 있다.

⑦ 사회교육 기회의 제공

청정에너지인 수력발전시설을 개발하여 지역 주민이나 마을의 장래를 짚어줄 아이들에게 에너지·환경에 관한 교육의 장을 제공할 수 있고, 일상적인 에너지활동이나 신·재생에너지의 보급촉진을 통해 지역 주민에게 홍보 및 계도활동도 할 수 있다.

⑧ 지역의 발전에 공헌

소수력발전을 위한 저수담은 치수, 관개, 상수도, 공업용수 등으로 사용이 가능한 지역사회의 기반시설이며, 또한 지역 주민에게 장소를 제공하고 문화적 행사 등 각종 행사의 장소를 제공할 수 있어 지역사회에 활력을 줄 수 있다.

(2) 수력발전의 개요

한편으로 수력발전의 기본적인 사항에 관하여 살펴보면 다음과 같이 정의되어 진다.

① 수력발전

중력의 영향으로 높은 곳에서 낮은 곳을 향하는 흐름을 수로로 끌어 들여 수차발전기를 회전시켜 전기에너지를 발생시키는 것이 수력발전의 원리이다. 유량  $Q[m^3/s]$ 을 낙차  $H[m]$ 로 떨어뜨렸을 때 발생하는 수력에너지는 식(1.1)과 같다.

$$P[kW] = 9.8 \times Q \times H \quad (1.1)$$

수력발전소에서는 적당한 치수의 수압관로로 수차에 물을 끌어들이기 때문에 낙차를 그대로 이용할 수는 없다. 따라서 이 손실이 발생하는 것을



고려하여 유효낙차  $H_e[m]$ 와 유량  $Q[m^3/s]$ 으로 산출되는 이론수력  $P_e[kW]$ 는 식(1.2)로 나타낸다.

$$P_e[kW] = 9.8 \times Q \times H_e \quad (1.2)$$

## ② 효율과 발전소출력

식 (1.2)는 에너지원으로서의 수력이 모두 전기에너지로 변환된 것으로 가정이지만 실제로는 에너지변환의 과정에서도 손실이 생기기 때문에 효율  $\eta$ 은 식 (1.3)으로 나타내진다.

$$\eta = [\text{출력}]/[\text{입력}] = [\text{출력동력}]/[\text{입력동력}] \quad (1.3)$$

수력발전에서는 수력 에너지로 발전기를 돌리는 수차의 축 동력으로 변환시킬 때 손실이 생기고, 축동력을 전력으로 바꾸는 발전기에서도 손실이 생긴다. 수차의 효율을  $\eta_t$ , 발전기의 효율을  $\eta_g$ 로 나타내면 수력발전기의 발전출력  $P[kW]$ 은 식 (1.4)로 나타낼 수 있다.

$$P[kW] = 9.8 \times Q \times H_e \times \eta_t \times \eta_g \quad (1.4)$$

현재 중·소수력용 수력발전기의 수차 효율은  $\eta_t = 0.75 \sim 0.92$ , 발전기 효율은  $\eta_g = 0.82 \sim 0.95$  정도이다.

## ③ 발전 사용수량과 발전출력

하천의 유량은 계절에 따라 다르다. 식 (1.4)로 발전출력을 산정하는 경우에는 발전소에서 연간 사용할 수 있는 수량을 유량  $Q$ 로 대입한다. 이 계산치를 상시 출력이라고 한다. 발전소의 설비용량은 사용수량의 최대치로 발전하는 최대출력으로 산정한다.

일반적으로 수력발전은 발전설비용량의 규모에 의해 Table 1.2와 같이 분류하고 있다. 수력발전소는 하천의 경사, 유황(流況), 지세(地勢), 지질(地質), 운송의 편리, 공사자재의 유무, 보상 물건의 과다여부, 하류 이용 낙차



의 유무, 유역면적의 대소, 전력부하의 예상, 송전선로 연계성 등을 감안한 경제성이 있을 때 건설되며 발전방식의 구조나 운영방법에 따라 Table 1.3과 같이 구분한다.

효과적인 소수력발전을 위해서는 각 지형에 따라 낙차나 유량이 달라지기 때문에 다양한 형식의 수차를 적용 해야 할 필요성이 있으며 수력개발지점에 맞는 수차형식과 효율이 높은 수차 선정이 필요하다. 잘못된 수차를 선정할 경우 수차의 효율이 저하되고, 진동이나 소음이 커지고 수차의 수명도 단축되므로 Fig.1.4에 보이는 것과 같이 다양한 형식의 수차를 설계를 통하여 선정하고 제작 및 설치하여 운용하는 것이 중요하다.

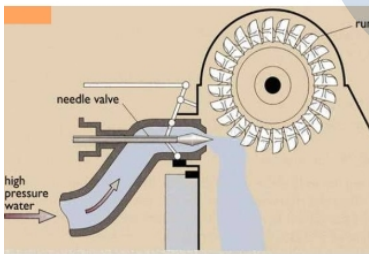
일반적으로 선정되는 수차의 종류를 에너지 발생면에서 대별하여 유효낙차의 계산방식에 따라서 Table 1.4에 보이는 것과 같이 충동수차(衝動水車)와 반동수차(反動水車)로 나눌 수 있다. Fig.1.5와 Fig.1.6에 개요를 보이고 있는 것과 같이 충동수차(impulse turbine)는 유수의 속도수두를 이용하고, 반동수차(reaction turbine)는 압력수두를 이용한다. 현재 실용화되어 있는 수차중에서 충동수차에는 펄턴 수차, 터고 수차, 횡류 수차 등이 있고, 반동수차에는 프란시스 수차, 프로펠러 수차, 사류 수차 등이 있으며 Table 1.5에 특징별로 구분을 하였다.

Table 1.2 Classification of hydropower<sup>[3]</sup>

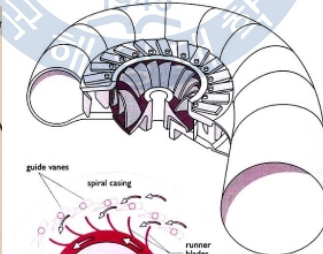
| 구분                        | 설비용량 기준              |
|---------------------------|----------------------|
| 대수력 (large hydropower)    | 100,000kW 이상         |
| 중수력 (medium hydropower)   | 10,000kW ~ 100,000kW |
| 소수력 (small hydropower)    | 1,000kW ~ 10,000kW   |
| 미니수력 (mini hydropower)    | 100kW ~ 1,000kW      |
| 마이크로수력 (micro hydropower) | 5kW ~ 100kW          |
| 피코수력(pico hydropower)     | 5kW 이하               |

Table 1.3 Category of hydro power plant<sup>[3]</sup>

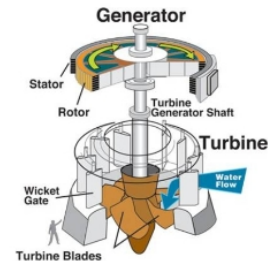
| 분 류 항 목 | 종 류   |
|---------|---|
| 물의 이용   | 유입식, 저수식, 조정지식  |
| 구조면     | 수로식, 댐식, 댐수로식   |
| 낙 차     | 저낙차( $H < 35\text{m}$ ) : 카플란, 프란시스, 튜블러<br>중낙차( $H = 35 \sim 250\text{m}$ ) : 프로펠러, 카플란, 프란시스, 사류<br>고낙차( $H > 250\text{m}$ ) : 프란시스, 펄턴 |
| 발전소 건물  | 옥내, 옥외, 반옥외, 지하, 반지하, 수중  |
| 기계의 배치  | 종축 : 저낙차 또는 중낙차의 발전소에 널리 사용 됨.<br>횡축 : 소용량 기기 및 펄턴 수차용<br>사축 : 저낙차용 튜블러 (주로 주축을 경사지게 사용)  |
| 제어 방식   | 수동, 직접제어, 원격제어, 원격감시제어  |



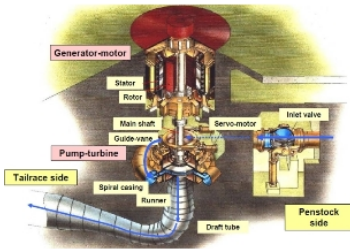
<Pelton>



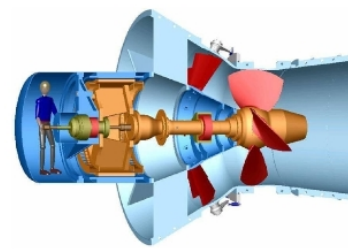
<Francis>



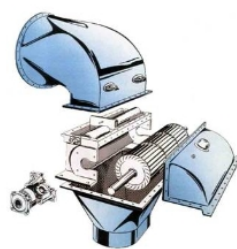
<Propeller>



<Pump>



<Bulb>



<Cross flow>

Fig.1.4 Types of hydro Turbine

Table 1.4 Method of effective head calculation<sup>[3]</sup>

| 수차의 종류               | 유효낙차 계산방법   |
|----------------------|---|
| 반동수차<br><Fig.1.5 참조> | $H_e = H_g - H_{L1} - H_{L2} - V_2^2/2g - h$ <p>여기서, <math>H_{L1}</math> : 취수구와 수조간의 손실낙차(m)<br/> <math>H_{L2}</math> : 수조와 수차입구간의 손실낙차(m)<br/> <math>h</math> : 흡출관과 취수구 수위의 고저차(m)<br/> <math>V_2</math> : 흡출관 출구의 유속(m/s)<br/> <math>V_2^2/2g</math> : 흡출관 출구의 손실낙차(m)</p> |
| 충동수차<br><Fig.1.6 참조> | $H_e = H_g - H_{L1} - H_{L2} - h$ <p>여기서, <math>H_{L1}</math> : 취수구와 수조간의 손실낙차(m)<br/> <math>H_{L2}</math> : 수조와 수차입구간의 손실낙차(m)<br/> <math>h</math> : 수차 중심과 방수구 수위와의 고저차(m)</p>  |

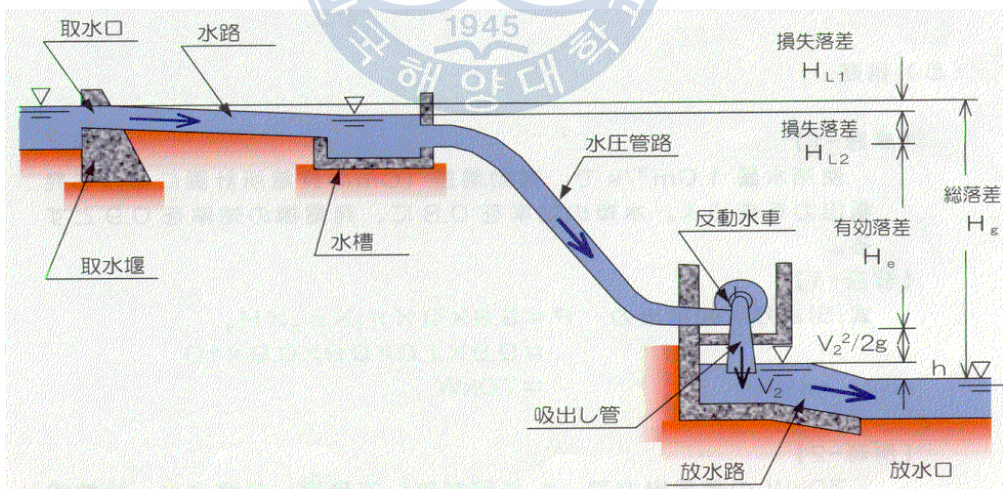


Fig.1.5 Relation of total head and effective head in power plant (Reaction turbine)<sup>[3]</sup>

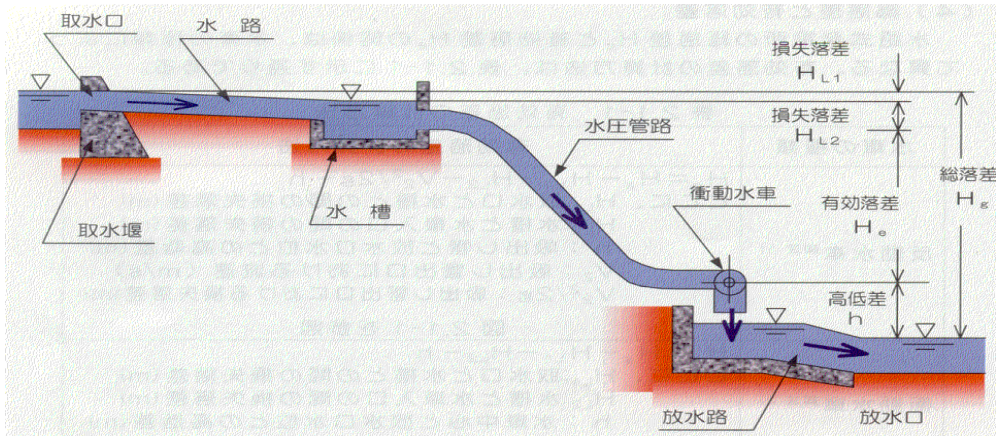


Fig.1.6 Relation of total head and effective head in power plant  
(Impulse turbine)<sup>[3]</sup>

Table 1.5 Comparison of the turbine's characteristic<sup>[3]</sup>

| 구 분 | 수 차 종 류  |   |
|-----|--|---|
| 충동형 | 펠턴수차(Pelton) : 고낙차에 적합하며, 유량조정이 최우선되는 경우에 사용이 가능             |   |
|     | 횡류수차(Cross flow) : 중·소수력용 수차로서 유량조절기능이 있으며, 저유량에서도 효율저하가 적음. |   |
|     | 터고수차(Turgo) : 중소수력용 수차로 저유량에서 효율저하가 작고 구조가 간단하며 유지보수가 용이 함.  |   |
| 반동형 | 프란시스수차(Francis) : 적용가능한 낙차 및 유량의 범위가 넓어 널리 사용됨               |   |
|     | 프로펠러수차<br>(Propeller)  | 고정 날개형 : 유량조절기능이 없으므로 낙차와 유량 변동이 적은 지점에 사용        |
|     |  | 가동 날개형(Kaplan) : 일정 유량변동에 대하여 적절한 대응이 가능          |
|     |  | 벌브형, 튜브형, 림형 : 주로 발전기와 수차의 모양으로 구별되는 제작사들의 표준화 사양 |
|     | 사류 수차(Diagonal)  |   |
|     | 펌프 수차 : 공용화로 원가가 낮지만 효율이 타 수차보다 낮음.                          | 프란시스형   |
|     |  | 사류형   |
|     |  | 프로펠러형   |



### (3) 소수력발전방식의 종류

소수력발전은 기존 시설물을 이용하여 발전설비를 설치함으로써 수력 에너지를 회수하며 다음과 같은 발전방식을 이용한다.

#### ① 하천수 이용

하천에 보(하천이나 수로를 횡단하여 설치되는 구조물)를 설치하여 취수하고 침사지·도수로·수조·수압관로에 의해 발전소까지 도수하고 발전후에 다시 하천으로 방류한다. 설비의 기본 배치는 개거(자유수면을 가지는 도수로)를 설치하여 도수로 하단에 설치한 수조로부터 발전소까지의 낙차(수위의 표고차)를 이용하여 발전하는 것이며, 하천의 경사가 비교적 완만한 지점이 적합하다. 취수방법으로서는 경제성과 친환경보전의 관점에서 될 수 있는 한 새로운 취수보 등을 설치하지 않고 하천에 자연스럽게 형성된 터널 등을 활용하여 취수하거나, 농업용 보 및 조정지 댐 등 기존 구조물을 이용하여 취수하는 것이 바람직하다.

#### ② 농업용수 이용

기존 농업용수로의 낙차를 이용하기 위해 짧은 수압철관을 설치하고 간이 발전설비를 설치하여 농업용수를 이용하는 것이다. 비교적 유량이 크고 안정한 물의 이용이 가능한 경우에는 기존 수로에 수중식 발전기 일체형수차 또는 투입식 발전기 일체형 수차를 설치하는 경우가 있다. 수로의 도중에 큰 낙차를 얻을 수 있는 곳에 낙차공 또는 급류공을 by-pass하는 형태로 취수하여 발전에 이용한 후 기존 수로에 다시 방류하는 시스템이다.

#### ③ 상·하수도, 공장 냉각수 이용

원수 취수지점으로부터 정수장까지 또는 정수장으로부터 배수지까지의 사이에 얻어지는 낙차를 이용하는 방식이다. 이 방식의 송수과정에서 관로 말단부의 관압을 감압하기 위한 감압용 밸브 등이 설치되어 있는데, 이 감압되는 수압을 소수력발전에 이용하는 것이다. 구체적으로 상·하수도의 밸브에 병렬로 설치한 수압관으로 수차·발전기를 설치하여 발전하고 동시에 수차에 의해 유량조절도 한다. 하수도를 이용하는 발전은 기본적으로는 최종처리시설에서의 배출수를 하천이나 해안으로 방류할 때의 낙차를 이용하는 발전방식이다. 또한, 하수도시설의 배치에서 상수도와 같이 하수처

리 후의 송수도중 감압용 밸브부에서 얻어지는 낙차를 이용하는 발전방식이다. 공장 내의 순환되는 물에 착안하여 순환과정에서 얻어지는 낙차를 이용한 공장 내 발전방식도 있다.

우리나라의 경우 공장에서 사용되는 물의 양은 상당히 많은 편이다. 이들 공장에서는 제품을 생산하기 위해서는 많은 양의 냉각수가 필요하다. 사용 후 배출되는 물의 양이 상당히 많기 때문에 그대로 버리기 보다는 재활용하는 측면에서 효과적인 수력에너지로의 개발이 효과적이다.

#### ④ 기타

기타 소수력발전으로서는 기존 댐에서 방류되는 하천유지유량을 이용하여 발전하는 방식도 있다. 또한 최근에는 고층 건물에서 배출되는 미활용 수자원이나 대형 건물이나 대단위 아파트 단지로 인입되는 상수관로 상에 남아있는 잉여에너지를 재활용하는 차원에서 미니급(피코급) 또는 마이크로급의 발전에 이용하고 있다.

#### (4) 소수력발전의 특징

소수력발전의 특징을 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 규모가 작기 때문에 발전설비를 설치할 때 지형을 변화시키지 않으며 사용하는 수량도 적어 하천수질이나 수생생물 등의 주변생태계에 미치는 영향이 작으므로 자연스러운 친환경 에너지이다.
- ② 발전을 수행하는 과정에 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 발생하지 않은 청정에너지이고 지구 온난화 방지에 공헌한다.
- ③ 일반적으로 발전 설비가 비교적 간단하여 단기간 건설이 가능하고 유지관리가 용이하다.
- ④ 소수력발전에 의한 전기를 지역 에너지사업에 이용하면 지역발전과 자연에너지 이용으로 상호작용하여 경제적, 사회적 및 심리적인 효과 등 지역 경제활동에 기여한다.
- ⑤ 기존 농업용수 시설이나 상·하수도시설 등을 이용한 발전계획이 가능하고, 발생전력에 의한 시설의 유지·관리비 경감에 기여한다.
- ⑥ 연간 사용가능한 수량 자료를 바탕으로 에너지 공급을 계획하면, 태양광 발전이나 풍력발전 등의 기후와 관련된 자연에너지에 비하여 공급 안정성이 우수하다.<sup>[3]</sup>

(5) 소수력 발전에 관한 선행 연구 사례

정부가 지난 1970년대 1,2차 오일쇼크를 겪으면서 소수력에 관심을 가지기 시작한 이후 1978년 강원도 횡성 안흥지역에 160kW급 입축프로펠러수차 3기를 설치한 우리나라 최초의 소수력발전소가 준공되었다. 이와 같은 노력과 더불어 최근까지 국내 소수력의 발전을 위하여 많은 연구가 있어왔다. 국내 소수력의 활성화 및 선진화를 위하여 지금까지 수행되었던 소수력 에너지에 관한 연구 자료를 살펴보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 구미하수처리장 방류구에서의 소수력 발전설치 타당성 평가에 관한 연구<sup>[4]</sup> : 하수처리장의 방류수를 이용한 소수력발전소 건설에 관한 타당성 조사에 관한 연구를 수행하였으며, 3.70cms 유량과 3.5m 정격낙차를 가지는 지점에 관한 연구를 수행 함. 경제성분석을 수행하였으며, 입축 튜블러형 수차를 사용하여 수차발전소를 건설할 수 있을 것으로 연구를 수행 하였으며, 수차효율은 74%, 발전기 효율은 92% 조건으로 설계를 수행하였다.
- ② 기후변화에 따른 소수력 발전량의 변동성에 관한 연구<sup>[5]</sup> : 소수력 발전소의 설계 초기 실제 연평균 발전량과 미래강우 예측을 통한 소수력 발전소의 예상 발전량의 산정을 통하여 소수력 발전소의 설계를 위한 조건을 분석 및 연구 하였으며, 수력 발전소를 건설을 계획할 경우 저수용량과 설계용량의 일정 한계 이상으로 크게 산정하여 발전량의 증가시킬 필요성에 대한 연구를 수행하였다.
- ③ 농업용 저수지의 소수력 부존량 조사<sup>[6]</sup> : 농업용저수지의 소수력 부존량을 파악을 위하여 7개소의 대상 저수지를 선정하고 모형에 의하여 발전량을 추정하였다. 또한 이러한 자료를 근거로 유역면적, 관개면적, 제당높이, 총저수량 등과 같은 인자들의 관계에 대한 연구를 수행하였다.
- ④ 발전소 해수 방수로 조류식 발전시스템에 관한 연구<sup>[7]</sup> : 하동화력발전소의 배수로를 대상으로 에너지 회수를 위한 조건 검토에 관한 연구를 수행 하였다. FLOW-3D를 이용하여 터빈의 설치 전과 설치 후에 대한 수치해석을 통하여 상호 비교 연구를 수행하였다. 터빈 형식은 조류발전에 사용되는 헬리컬형을 이용하여 연구를 수행 하였으며 이러한 터빈 형식은 아직 소수력 분야에서는 발전소 내 적용사례를 찾아보기 힘들다.

- ⑤ 배수로 수위조절을 통한 소수력 성능개선<sup>[8]</sup> : 발전소 냉각수 방류구에 설치된 소수력 발전소에 있어서 발전량을 증대시키기 위한 가동보의 활용범위에 대한 고찰 수행하였다. 기존 고정보에 1m 가동보를 이용한 수차발전기의 운전 및 정지에 관한 연구를 수행하였다.
- ⑥ 내부모델원리(internal model principle)를 이용한 소수력터빈 안정화<sup>[9]</sup>: 소수력발전설비의 수학적 모델 검토 및 주기적 외란으로 인한 출력 진동에 관한 연구를 수행하였다. 연구의 목표는 출력 진동을 제거하는 것을 주된 목표로 하였으며, 주기적인 외란의 주파수를 제거하여 수차의 효율을 향상시키기 위한 연구를 수행하였고 이러한 연구의 결과로 출력과 전력계통의 안정화에 기여가 가능할 것으로 예측하였다.
- ⑦ 소수력 개발을 위한 타당성 분석 방안<sup>[10]</sup>: 하천유역에서 소수력 개발을 위한 타당성 분석 방안에 대한 연구 수행 및 초기비용 산출을 위한 기존 소수력발전소의 비용 자료를 검토하여 함수식을 도출하고자 연구를 수행하였다.
- ⑧ 소수력 발전용 수문형 수차 형상 최적화 연구<sup>[11]</sup> : 저낙차, 고유량의 조건을 가진 지점에 적합한 소수력 발전용 축류 프로펠러 수차의 형상 최적화를 위해 러너 매수와 피치각, 익형등의 변수를 적용하여 최적화를 위한 연구를 수행 하였다. 이론적인 산출 근거를 제시하여 향후 개발시 적용을 제안하였다.
- ⑨ 소수력 발전을 위한 농업용 저수지의 적지 선정 평가<sup>[12]</sup> : 소수력 발전소의 개발을 위한 타당성 조사를 수행하기 위한 연간발전량 추정 및 농업용 저수지의 유역면적, 총낙차, 가동률, 전력기준단가의 변화에 따른 경제성 분석등을 수행하였다. 일반적인 소수력 발전소 건설을 위한 설계서의 내용을 세분화 하여 조사 연구를 수행하였다.
- ⑩ 소수력 수차발전기의 선정과 무인화 운영기술<sup>[13]</sup> : 프란시스 수차 및 프로펠러 수차와 유도발전기 선정 사례를 제시하고 소수력 발전소에 최신 IT기술을 접목시켜 무인화 시스템으로 구축하여 운영한 기술과 구축사례를 제시하였다. 무인운전시스템을 통한 경제성을 확보하여 소수력 개발 및 활성화 방안을 제시하였다.
- ⑪ 소수력 자원량 산정과 지리정보시스템 구축<sup>[14]</sup> : 현재 국내에 사용하고 있는 소수력 자원지도시스템 개선 및 자원량 산정의 정확도 향상을 위한 세분화 작업을 수행하였다. 소수력 자원정보와 분석기능을 가진 지



리정보시스템 구축에 관한 연구를 병행하였다.

- ⑫ 소수력용 튜블러 수차의 최적설계 및 성능특성에 관한 연구<sup>[15]</sup> : 튜블러 수차의 기본적인 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 5kW급 모형설비를 이용한 실험을 위주로 기술하였다. 또한 10m 급 낙차에서 발전가능한 상업용 마이크로 튜블러 수차 설계를 위한 최적설계법을 제안하였다.
- ⑬ 수도관로 소수력발전설비 운영효율 향상을 위한 최적제어방안<sup>[16]</sup> : 수도관로에 설치된 소수력발전설비의 출력제어요소에 따른 운영효율의 비교 분석을 수행하고, 분석자료를 근거로 최적제어에 관한 연구 및 운영효율 향상을 위한 방안을 제시하였다.
- ⑭ 신천하수종말처리장에 도입한 소수력 발전소의 경제성 분석에 관한 연구<sup>[17]</sup> : 소수력발전시스템의 원리 및 특성, 보급현황, 법적기준등을 조사하여 하수처리장의 운전 자료와의 비교분석을 통하여 소수력 발전시스템의 효율성을 검토하였다. 또한 검토자료를 근거로 소수력 발전시스템의 경제성 분석을 수행 하였다. 연구 조사결과 하수처리장내 실제 발전량은 설계시 예상발전량의 31% 수준에 머무르고 있는 것으로 확인하였다.
- ⑮ 실험 및 CFD에 의한 마이크로급 횡류 및 튜블러수차의 성능특성에 관한 연구<sup>[18]</sup> : 국내에 도입하여 실용화시키기 용이한 충동형 수차인 횡류수차와 반동형 수차인 튜블러 수차의 입지조건에 따른 성능특성 분석 및 CFD 해석을 통하여 신뢰성을 확보할 수 있도록 기초연구를 수행하였다.
- ⑯ 정수장의 유입원수 낙차를 이용한 소수력 발전<sup>[19]</sup> : 천상 일반정수장내 소수력 적지의 발전량 산정 및 설비계획에 관한 연구를 수행하여 소수력 발전소의 경제성을 검토하였다.
- ⑰ 직결형 소수력 발전기 출력 증대를 위한 최적제어 기법 분석<sup>[20]</sup> : 수차발전기의 배치에 따른 운전특성 예측 및 직렬연결에 따른 운전특성에 대한 자료 분석을 통하여 최적 시스템 구성을 위한 연구를 수행하였다.
- ⑱ 하수처리장 소수력 발전 경제성 평가에 관한 연구<sup>[21]</sup> : 소수력 발전소의 적용을 위한 타당성은 적용위치, 사용수량, 유효낙차, 발전용량에 의하여 설정됨을 연구를 통하여 확인하였다. 하수처리공정상에 수차발전기가 설치되어도 문제가 없으나 염소 접촉조 방류단에서 방류수문사이가 가장 적합한 지점으로 연구결과 확인하였다. 특히 신천하수처리장의 경

우 경제적 타당성이 있는 것으로 결론을 내렸다.

- ①⑨ 수도관로 소수력 발전설비의 수격작용으로 인한 고장 대책<sup>[22]</sup> : 수도사업장 수도관로상의 소수력 개발에 따라 수차발전기의 운영시 내외부적인 사고로 비상정지 동작이 발생할 경우 관로에서 발생하는 수격작용으로 인한 고장에 대한 문제점을 분석하고 대책을 강구하는 연구를 수행하였다. 수충격의 최소화를 위해서는 수차발전기의 동력전달 축을 직결형으로 구성하는 것이 가장 안전하며, 안내깃의 폐쇄 시간을 관로주기보다 약간 느리게 구성하는 것이 운영상에 효과적인 것으로 결론을 내렸다.
- ②⑩ 해양소수력 건설에 따른 방류수로의 수위 변화 특성 분석<sup>[23]</sup> : 삼천포 화력발전소에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수를 이용한 소수력발전소의 건설에 따른 운전상태를 고찰하였다. 또한 예측값과 실제 계측값을 비교 분석하였으며, Flow-3D를 이용하여 3차원적인 수리해석 기법을 적용하여 다양한 예측을 시도하였다.
- ②⑪ 수도관 차압을 이용한 마이크로 튜블러수차의 최적설계법에 관한 연구<sup>[24]</sup> : 튜블러 수차의 설계법에 관한 연구를 수행함과 동시에 모델테스트를 통한 실험과 CFD 분석을 통한 데이터 분석을 수행하여 수차의 운전범위에 대한 고찰을 수행하였다.
- ②⑫ 소수력 발전용 수력터빈의 최적설계<sup>[25]</sup> : 프란시스터빈과 튜블러 수차의 유동해석을 통한 성능 검증을 수행하였다. 예비설계의 개념에서 접근하였으며, CFD 분석에서 연구를 종료하였다.
- ②⑬ 소수력 발전시스템의 설계파라미터 분석 및 설계에 관한 연구<sup>[26]</sup> : 소수력의 입지조건, 수문자료, 전력현황분석 등을 통한 최적설계를 위한 프로그래밍 작업을 수행하였으며, 설계파라미터 작성에 관한 연구를 수행하였다.
- ②⑭ 소수력 터빈용 복수 기계평면시일의 최적화 설계에 관한 연구<sup>[27]</sup> : 다구찌 기법을 이용하여 수차 회전축의 밀봉을 위한 Mechanicla Seal 설계에 관한 연구를 수행하였다.
- ②⑮ 보(洑)를 이용한 ‘저낙차대유량’ 소수력 발전소 건설<sup>[28]</sup> : 하천형 수력발전소 시공사례를 통하여 주요 시공사례를 소개하고, 하천공사의 특징으로 인하여 설계 및 시공 시 반영해야 할 사항에 대하여 몇가지를 소개하였으며, 표준화를 통한 건설비 절감, 발전 단가의 기준가격 현실화를 통한 재정적인 지원 및 법규정비를 통한 제도적인 도움이 뒷받침 되어

야 경쟁력있는 사업으로 발전해 나갈 것을 강조하였다.

- ②⑥ 소수력발전소의 출력특성 분석<sup>[29]</sup> : 소수력발전소의 출력특성분석 및 설계유량 산정을 위하여, 미계측 하천의 유량지속특성을 표현할 수 있는 모델과 특성화된 유량지속함수를 이용하여 소수력발전입지의 성능특성을 분석하고 예측할 수 있는 성능분석 모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 소수력 발전소에서 부분출력과 정격 출력을 구하는 방법과, 소수력 발전소가 최대한 정격으로 가동될 수 있는 유량과 시간비를 산출하였다.
- ②⑦ 농업용 취수보를 이용한 소수력발전시설 특성 분석<sup>[30]</sup> : 농업용 취수보를 대상으로 소수력 발전시설의 성능분석 기법을 이용하여 소수력발전시설 적용 타당성을 조사·분석하였다.
- ②⑧ 자연에너지를 이용한 소수력 출력증대 방안 연구<sup>[31]</sup> : 자연환기의 단점을 보완하여 기계환기의 적용을 권장하였으며, 주암댐 내 소수력 발전실의 건물내 밀폐로 인한 냉각 기능의 약화를 개선하였다. 또한 도수관로 점검용 갤러리실의 차가운 공기를 이용하여 소수력 출력증대에 미치는 효과를 분석하였다.
- ②⑨ 군위댐 소수력발전기 시공 및 운영개선 사례<sup>[32]</sup> : 군위 다목적댐에 설치된 소수력발전기에 대한 설치공사 중 수차 설계도면 해석오류에 의한 가이드베인 과다 개방으로 인한 설비 고장 개선사례, 수차효율시험을 통한 댐 수위별 최적 운영방안 검토 등에 대한 연구를 수행하였다.
- ③⑩ Spring water를 이용한 소수력 개발<sup>[33]</sup> : 원조사업의 일환으로 수행된 이라크 베칼 지역 전력공급을 목표로 수행하고 있는 수차발전소 건설공사에 관한 내용으로 일반적인 하천수를 이용하는 대신 지하에서 분출되는 용출수와 급경사를 이용하여 소수력을 개발하는 내용에 관한 연구를 수행하였다.

## 1.2 연구의 필요성

우리나라의 소수력 개발은 강원도 횡성군 안흥소수력발전소(설비용량450kW)가 1978년에 최초로 준공되었다. 경제성이 부족하여 개발이 미진하였던 소수력이 최근 수차발전기의 국산화와 정부의 보급 확대정책 등이 뒷받침되어 공공기관에서 민원발생 우려가 없는 기존 시설물을 이용한 소수력이 활발하게 개발되고 소수력 개발의 경제적 타당성이 입증되고 있다. 국내 소수력 개발 현황은 2007년10월말 기준으로 개인사업자 16개소, 한국수자원공사 16개소, 한국전력공사 및 발전회사 8개소, 지자체 5개소(하수종말처리장 4개소, 정수장 1개소), 한국농촌공사 6개소 등을 합하여 총 51개 지점에 65,412kW 설비용량이 개발되었으며, 연간전기생산량은 157,279MWh에 달하고 있다.

국내 소수력은 개발 자원에 대한 조사결과 경제성이 확보된 곳이 많지만, 초기 투자비의 과다와 민원 문제로 계획대비 설치 비율은 다른 에너지원에 비해 상당히 낮은 편이다. 따라서 소수력에 대한 설치 및 가동현황 및 실적은 다른 신·재생에너지에 비해 계속 낮아지고 있다.

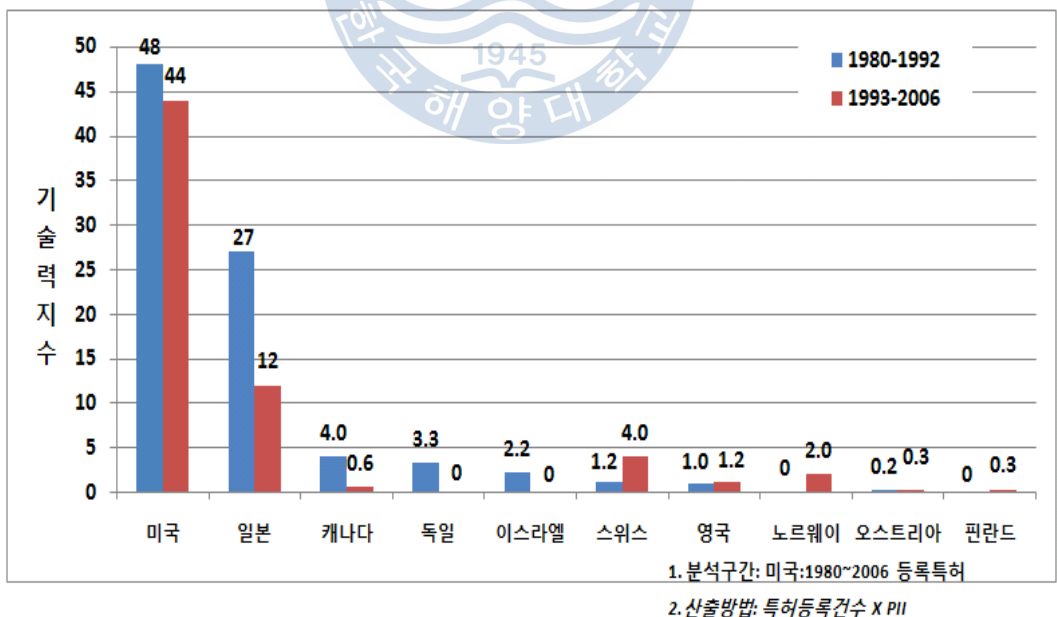


Fig.1.7 Technology index of leading countries (New-Renewable Energy, 2030)

소수력 개발 보급은 여러 가지 사정으로 인해 매년 꾸준히 증가하지 못하고 일정한 비율로 현상 유지되기 때문에 소수력에 필요한 수차 및 발전기의 효율 향상을 위한 기술개발 여건이 조성되지 못하고 있으며, 주문 제작으로만 이루어지고 있어 설비용량에 따른 표준화가 정립되지 않아 제작단가의 상승 및 제작기간의 과다 소요는 물론 제품의 가격 경쟁력도 다른 에너지원에 비해 상대적으로 낮은 편이다. Fig.1.7에서는 세계 주요 국가의 소수력 관련 국가 기술력 지수에 대하여 분석한 자료를 보이고 있다. 또한 국내 소수력 기반사업의 취약성에 대하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

#### (1) 보급상의 애로사항

소수력 에너지는 친환경적이고 지속가능한 에너지로 그 중요성이 커지고 있지만 우리나라에서 소수력 개발보급 비중이 높지 않은 것은 다음과 같은 이유에 기인한다.

##### ① 경제성 부족

소수력은 초기 투자비의 과다와 민원 문제로 경제성이 낮아 계획대비 설치 비율은 타 신재생에너지에 비해 계속 낮아지고 있다. 소수력의 건설단가는 소수력자원의 이용형태, 개발지점의 여건 및 발전설비용량에 따라 건설 투자비용이 다르므로 현재의 발전차액기준가격으로는 경제성이 확보되지 않아 이미 계획된 지점은 물론 잠재 소수력자원 개발이 어렵다. 소수력을 개발하여 보급을 확대할 수 있는 지점은 일반하천을 이용한 방법밖에 없다. 일반하천의 경우 소수력개발에 따른 환경피해를 염려한 환경단체와 지역주민의 인식 부족과 마이크로급(1백kW급 이하) 소수력 자원의 활용을 위한 제도적 지원책이 없다. 소수력발전소의 평균 가동율은 35% 정도이고, 설비용량이 작아져 유량확보를 위한 토목공사 개발비용이 증가하기 때문에 현재의 발전차액지원제도로는 경제성 확보가 어렵다. 2000년 이후에 공공기관에서 기존 시설물(댐, 저수지, 하수종말처리장, 수도관로, 화력발전소)을 이용한 소수력 발전소를 건설하여 보급하고 있을 뿐이다. 해외 에너지 의존도를 저감시키고, 국내 부존자원의 활용을 촉진하기 위해서는 경제성 확보를 위한 발전차액 기준가격의 현실화가 필요하지만 이를 위한 기본적인 기술개발도 중요하다.

## ② 투자규모의 절대적 부족

정부에서는 소수력 개발을 활성화하기 위해서 산·학·연 기술개발, 실증연구 지원, 발전사업자에 대한 설치비 용자, 지자체 지원 사업, 발전차액지원제도 등을 확대해왔으나, 발전사업자가 인센티브를 느끼지 못하고 있다. 소수력은 1987년부터 기술개발을 시작하였으나, 1990년대 저유가시대를 거치면서 기술개발에 대한 관심과 투자가 저조하였다. 소수력 기술개발 지원현황은 1991년부터 2006년까지 9개 과제에 약 51억원이 투자되어 신·재생에너지 기술개발 예산의 0.75% 수준으로 타 에너지원에 비해 미약하여 경제성확보를 위한 기술개발과 상용화에 어려움이 있었다. 일부 형식에 대한 수차발전기의 국산화 성과도 있었으나, 타 에너지원에 비해 적은 예산으로 분산해 지원함으로써 초기시장 형성에 실패하였다. 그래서 발전사업자가 발전소 건설에 투자하여 운영하기에는 경제성이 없는 에너지라는 부정적 인식이 팽배해 있다.

## ③ 국내 산업기반의 취약

소수력은 국내 시장이 협소하고 산업기반이 취약하여 연구인력, 연구기반 등 기술개발을 위한 인프라가 열악하고 발전설비 원가절감을 위한 경쟁력 제고에 한계가 있다. 소수력은 발주처의 시방조건인 개발지점의 유량 및 낙차에 따라 수차(허브, 날개)의 설계조건을 각각 계산하여 주문생산에 의한 제작으로 표준화가 되어 있지 않아 소수력의 기술수준 및 국산화율은 선진국의 80% 수준이다. 수차 설계기술 등 주요 핵심기술은 70% 수준이며, 특히 주요 시스템기술, 수차효율 기술수준이 선진국에 비해서 약 6% 정도 낮은 것으로 평가되고 있다. 소수력 발전설비는 설계기술 및 제작기술의 국산화가 일부 완료되어 상용화하고 있으나, 국내의 자본과 기술력이 있는 대기업에서 소수력발전시스템을 국산화하여 국제 경쟁력을 갖출 수 있도록 참여를 유도하는 정책이 필요하다.

## ④ 인·허가에 따른 갈등

소수력개발을 위한 인·허가 절차는 하천법에 의한 하천점용허가, 전기사업법에 의한 전기사업허가와 개발을 위한 도시계획시설결정, 개발행위허가, 건축허가등 지자체 허가 행위가 있다. 이러한 허가행위 등과 함께 수자원과 관련된 갈등은 물의 이용은 물의 이용·개발·보전을 둘러싼 갈등과 하천,



저수지 및 지하수와 같은 자연공물을 대상으로 하는 갈등이 있다. 특히 해양소수력의 경우 육상의 허가와는 달리 공유수면을 자유로이 사용하는 어촌계나 잠수회등의 사전동의를 확보해야하는 어려움이 있다. 소수력은 이러한 개발지점의 선정 및 동의 과정에서 이해관계자의 협의 또는 지역주민의 동의과정에서 과도한 민원요구로 사업추진이 보류 또는 중단되는 사태가 일어나고 있다.

#### ⑤ 소수력 보급시장 창출의 애로

소수력 자원 잠재량에 비해 자연여건도 타국에 비해 유리하지 않은 상황이다. 우리나라는 강우량이 홍수기(6월~9월)에 집중되어 소수력 개발지점의 기상상황 및 댐운영 결과에 따라 가동율의 편차가 발생하고 소수력개발에 따른 입지선정 문제로 개발지점 제약되어 시장창출에 애로가 있다.

### (2) 국내산업의 현황

2011년 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고를 계기로 안전하고 환경 오염을 일으키지 않는 청정에너지에 대한 관심이 더없이 높아지고 있는 시점에서 적절한 에너지원의 확보가 필요한 현 시점의 국내 현황은 다음과 같다.

#### ① 수력 등의 친환경 에너지 개발

국제적인 환경요인에 부응한 각국의 친환경 에너지개발은 기술적, 사회적, 환경적 효과의 높은 기대치로 인하여 가장 안정적인 기반기술이 확보되어 있는 수력발전설비의 투자로 확대되어 가고 있다. 특히 저개발국가에서의 수력개발 수요와 의지가 날로 증대되어 가고 있다. 국제적으로 에너지와 환경 정책이 피할 수 없는 현실로 다가 왔음에도 불구하고, 국내 친환경 수력 에너지 산업 분야의 기술은 다른 산업에 비하여 후진성을 면치 못하고 있는 실정이다.

#### ② 발전설비의 국산화 및 표준화

국내에서 적용되고 있는 수차발전기의 형식은 중소기업인 대양전기에서 설계 제작할 수 있는 능력의 범위내에 국한되어 있었다. 최근 들어서야 사양의 다변화를 위한 움직임을 보이고 있는 정도이며, 대부분의 소수력발전소는 표준화 되어있지 못하다. 국산 수차가 개발되기 전에는 대부분 외국에서

도입하였기 때문에 고가이었고 유지보수용 부품확보에 어려움이 있었다. 국산 수차는 외국에서 제작한 수차와 비교하여 설계 및 제작의 품질과 수차 부속설비(개도조절장치, 수밀장치, 냉각설비, 제어설비 등)가 미흡하여 수명과 신뢰성에 대한 지속적인 관리가 필요하다. 수차개발은 처음부터 실무수차를 상용화로 개발하기 어렵기 때문에 작은 규모의 모형 수차를 설계, 제작하고 주로 유체학적인 성능실험을 통하여 설계특성을 분석한다. 수차개발을 처음부터 실무로 개발하지 못하는 이유는 개발된 수차를 실험할 수 있는 수력발전소가 건설되어야 가능하고 시행착오를 거쳐야 한다. 따라서 연구개발을 통하여 개발된 수차는 상용화 과정을 통하여 문제점을 해소하고 수정 보완함으로써 신뢰성을 확보할 수 있다.

발전기의 경우 수력, 화력, 원자력 등 모든 곳에 적용되고 있는 것으로서 대부분의 경우 중대형 위주의 것으로서 소수력에 바로 적용 가능한 발전기에 대한 내용의 제작 기술개발은 미흡한 실정이다. 소수력 발전설비라고 해도 수백~수천 kW 정도의 경우 다른 발전원에 이용되고 있는 발전기 기술을 바로 도입하면 되지만, 최근 소수력에 적용되고 있는 발전기의 경우 수천에서 수백 또는 그 이하 용량의 발전기가 상대적으로 많이 보급되어야 하기 때문에 이에 적합한 발전기의 설계 보급이 느린 상태이다.

소수력 발전소의 보급이 활성화될 경우 중전기 제작회사에는 설계 제작에 필요한 인력의 확보가 필요할 것이고, 설치 후 운영에 필요한 인력은 현장에서 필요로 하기 때문에 관련 전공자의 인력수급에도 매우 도움이 될 것으로 판단된다. 전동기에 필요한 철심 및 동기의 경우 효율 개선을 위한 연구가 매년 진행되고 있다. 대형발전기의 경우는 물론 소형 발전기에도 유도전동기에서와 같이 고효율 재료의 적용을 통해 효율을 높이기 위한 연구가 연구기관을 중심으로 점차 진행되고 있다.

발전기의 효율은 수차의 효율에 비해 상대적으로 약간 높지만, 발전소 운영 조건과 부하 등에 따라 효율이 변하는 특성을 지니고 있다. 대형 발전기의 경우 효율은 소형에 비해 용량이 커질수록 출력에 대한 손실비중이 낮아 효율이 높다. 그러나 소형의 경우는 대형과는 반대로 출력에 비해 손실이 차지하는 비율이 높아 효율은 낮은 편이다. 또한 동기발전기에 비해 유도발전기가 상대적으로 약간 효율이 낮은 편이다. 따라서 발전기의 효율을 높이기 위한 여러 가지 연구가 선진국과 소수력의 보급이 많은 나라를 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 효율을 높이기 위한 연구로서는 발전기를 그대



로 두고 운전방식의 변경을 통한 효율 제고와 설계 및 제작기술의 업그레이드를 통한 효율 향상 및 발전기에 사용되는 재료의 품질 향상을 통한 효율향상이 시도되고 있다.

소수력의 효율은 주로 터빈의 특성에 좌우되는데 이는 발전기 효율은 매우 높은 수준이지만 수차의 효율은 상대적으로 낮은 편이다.

발전기에 전기적인 에너지를 제공하고 있는 터빈 및 수차 효율은 다음과 같다. 일반적으로 사용되고 있는 수차의 경우 60% 정도의 낮은 효율을 나타내지만 높은 경우에는 95%까지 높은 효율을 보증하고 있다. Table 1.6에서는 현재 일반화되어있는 소수력용 수차의 효율을 보이고 있다.

Table 1.6 Typical efficiency of turbines and water wheels

| Prime mover       |                 | Efficiency range(%) |
|-------------------|-----------------|---------------------|
| Impulse turbines  | Pelton          | 80~90               |
|                   | Turgo           | 80~95               |
|                   | Cross-flow      | 65~85               |
| Reaction turbines | Francis         | 80~90               |
|                   | Pump-as-turbine | 60~90               |
|                   | Propeller       | 80~95               |
|                   | Kaplan          | 80~90               |
| Water wheels      | Undershot       | 25~45               |
|                   | Breastshot      | 35~65               |
|                   | Overshot        | 60~75               |

### ③ 계통보호 및 자동화

소수력발전 개발에 있어서 가장 큰 문제점은 발전소가 원격지에 위치하고 있기 때문에 고급의 운전기술자를 상주시키기가 곤란하고 또한 많은 기술자의 상주시에는 운영상의 인건비 및 관리비가 차지하는 비중이 크기 때문에 경제성이 저하된다. 또한 소수력발전소의 경제성 향상에 영향을 미치는 것은 계통연계에 소요되는 비용이다. 계통보호를 위하여 요구하는 송배전

설비를 갖추기 위해서는 설비규모의 대소를 막론하고 전체공사비에서 차지하는 송배전설비비의 비중은 설비규모가 작을수록 더 커서 경제성이 저하되는 결과를 초래하고 있다.

소수력발전소의 경제성을 향상시키고 보급을 원활히 유도하기 위해서는 계통병입 안전장치를 국산화 개발하고, 특히 전자식 계전기를 국산화하여 수배전반을 표준화, 간소화하고, 제어시스템과 통신이 가능하도록 하여야 한다. 또한 소수력발전시스템을 ON-LINE상에서 진단하고 무인화 운전할 수 있는 설비와 기술을 개발하여 가능한 한 소수력발전소의 상주인원을 감소시키고 안정된 발전을 행함으로써 소수력발전소의 경제성을 향상시켜야 한다. 자동제어로 운영되는 복잡한 시스템을 최적으로 유지시키기 위해서는 기존 운전자의 감시와 조작만으로는 현실적으로 실현이 불가능하며, 새로운 운전 관리기술이 필요하다. 소수력발전설비의 고장 검출 및 진단 시스템은 시스템의 성능저하를 미리 예측하거나 부품 손상 등을 신속히 검출하여 운영자에게 정보를 제공함으로써 시스템을 항상 최적의 상태로 유지시켜야 한다. 국내 소수력 유도발전기 계통병입 제어반의 기술은 크게 낙후되어 외국산 계전기 및 국산계전기를 조합하여 제어반을 제작하고 있다. 따라서, 제어반의 부피도 커지고 가격도 높은 것이 현실이다.

소수력발전소에 사용되는 주파수계전기 등은 국산이 없고 수입에 의존하고 있으며, 다수의 계전기를 조합하여 조립하므로 가격이 고가이고, 또한 표준화된 계통 병입 기술이 없고, 한전측의 요구에 의존하므로 지역마다 계전기 설치기준이 다르다.

소수력발전소의 건설비와 유지관리비를 절감하여 경제성을 향상시키기 위해서는 수입에 의존하는 계전기에 대하여 국산디지털종합계전기로 대체하여야 하며, 전자식 수배전반과 통신이 가능한 소수력전용 RTU(remote terminal unit)를 개발하여 ON-LINE상에서 소수력발전설비를 무인화 운전할 수 있는 설비와 기술을 개발하여 소수력발전소의 운전요원을 감소시켜야 한다.

#### ④ 성능평가 기술 및 현대화

소수력 발전설비의 국산화는 상당한 발전을 이루었지만 수차 및 보조기기에 대한 체계적인 기술기준이나 평가방법 및 소수력 성능을 평가할 검사기관이 정립되어 있지 않은 실정이다.

2011년 한국수자원연구소와 한국산업기술시험원에서 에너지관리공단의 지원으로 수행한 소수력발전설비의 기술기준 및 성능평가 기반구축사업이 종료됨에 따라 소수력 성능인증 기준을 마련 및 이에 따른 성능평가센터 지정 기준 안을 마련할 수 있는 계기가 마련되었다고 볼 수 있다. 대수력의 경우에는 수차의 설계·제작사가 주로 외국이고 이에 따라 성능평가 용역을 주로 외국 제작사에 상당한 기술료를 주고 수행하고 있는 현실이다. 2012년 완공으로 발전소를 가동하고 있는 4대강 보에 설치된 수차발전기의 경우도 주요기술과 설치 및 설계는 모두 선진 수차 제작사들의 제품으로 설치되었다. 국내의 수력발전설비는 평균 사용 년 수가 약 20년이 넘어 향후 설비현대화가 빠르게 진행될 전망이며, 해외 수력의 경우도 사용 연수 증가로 인한 설비 현대화가 활발히 진행되고 있으며, 이를 위한 상태진단이나 용량 증대 사업 시행 가능성 높다. 기존 수력발전소의 개량(rehabilitation)은 효율증대뿐 만 아니라 용량증대(repowering)를 통해 신규 수력 건설효과를 거두고 있다. 대수력의 경우, 수차발전기 성능평가를 통한 설비현대화 분야는 주 공급을 외국 제작사에 의존하고 있어 현재까지는 국내 산업이 활성화 되지 못한 상태이다. 국내 발전회사들도 관련 장비와 인력의 미보유로 성능평가를 수행하고 있지 않다.

### (3) 타 산업과의 연관성

소수력은 토목, 건축, 기계, 전기, 전자통신 부분 등의 복합적인 시스템 기술로서 정부에서 선택과 집중에 따른 전략적인 투자로 기술개발과 산업화를 지원하면 소수력 보급이 활성화 될 수 있다. 소수력기술은 순수 국내 기술로 확립된 기술이며 소수력 개발지점의 특성에 적합한 수차발전설비를 표준화하고, 신기술 건설공법을 도입하여 건설비용을 저감시켜 경제성을 향상시키면 관련 산업이 활성화 될 수 있다.

소수력 자원의 적극적인 개발은 사장되는 에너지원의 개발 차원뿐 아니라 경제·사회적으로 전력 수요 급증시의 부하 평준화 효과, 석유 수입 대체 및 민간 주도의 반영구적 사업으로서 환경 친화적인 에너지원의 개발과 부수적으로 지역개발의 촉진과 경제적 파급효과, 관련기술의 수출 산업화 등의 효과를 거둘 수 있다. 막대한 소수력 자원 잠재량에 비해 강우량이 홍수기(6월~9월)에 집중되어 연간 이용율이 낮을 수밖에 없어 타국에 비해 크게

유리한 자연여건도 아니다. 이러한 어려운 여건을 극복하기 위해서는 소수력발전의 필요성을 확실하게 갖고 일관성 있는 정책을 통해 안정적인 투자환경을 조성하고, 선택과 집중에 따른 전략적 투자로 기술개발과 산업화를 지원해서 수요창출을 도모할 필요가 있다.

수력발전설비의 생산 신장률은 선진국, 발전도상국 모두 공통적으로 높고 「정보화, 기기의 전력전자화」의 조류가 선진국, 개발도상국을 막론하고 진전되고 있다. 우리나라는 개발도상국과 선진국의 중간입장에서 발전해 가고, 개발도상국의 양상을 서서히 벗어나 선진국형의 산업발전 패턴을 찾아 나갈 것으로 예측된다. 따라서 향후 10년간 전기기계의 일렉트로닉스 관련 산업이 선도자 역할을 하게 될 것이 틀림없으며 친환경 에너지 분야도 이와 같은 기술 경향에 맞추어 발전해 나갈 것으로 전망된다.

국내 수력 발전산업은 다목적댐 개발에 따른 대형 발전소 위주로 개발되었으나, 입지조건이 유리한 개발지점이 적고 또 남아 있는 지점도 소규모일 뿐만 아니라 환경보호 문제로 대형 수력개발은 점차 어려워지고 있다.

최근에는 유가상승과 기후변화협약 등에 따른 신재생에너지 개발이 적극 장려되어 소수력 개발이 활발하게 추진되고 있으나, 국내시장이 협소하여 관련기업의 참여가 저조하다.

국내 소수력 에너지는 부존 잠재량에 비해 개발량은 부진한 실정이며, 특히 환경 친화적인 청정에너지로서 수도관로, 화력발전소 온배수, 농업용 저수지, 하수종말처리장 등에도 소수력을 개발할 수 있으므로 적용범위가 급격히 확대되고 있다. Table 1.7에는 최근 국내 소수력 개발을 위한 보급 잠재량에 대한 자원조사 결과를 보이고 있으며, Table 1.8에는 기존 시설물에 수차발전기를 설치하여 운영할 수 있는 개발가능 용량과 연간 발전량에 대한 국내의 설비별 분포를 보이고 있다.

우리나라의 소수력개발은 산과 계곡이 많은 지역적 특성을 이용하여 댐이나 소하천을 이용한 발전방식이 주종을 이루었으나, 개발주변지역의 각종 민원이 있으며 전력판매 단가가 낮고 수량의 계절별 편중에 따른 연중 지속적인 발전불가로 가동율이 40% 정도로 경제성이 부족하여 소수력 개발이 원활하게 이루어지지 않았다. 그런데 최근에 정부의 신·재생에너지 보급 정책에 따른 지역에너지 보급사업, 신·재생에너지 공급협약(RPA)과 발전차액지원제도로 소수력개발 필요성이 증폭되면서 공공기관에서 민원발생 우려가 없는 기존 시설물인 댐이나 농업용 저수지, 하수처리장, 수도용 관로,

하수종말처리장, 화력발전소의 냉각수 등을 이용한 소규모 소수력 개발이 활발하게 추진되고 있다.

일반하천을 이용한 소수력 개발은 민원발생으로 인한 인·허가 추진의 어려움과 경제적 타당성 부족으로 인하여 민간발전사업자가 소수력을 개발한 사례는 덕송수력 발전소('93.03.22 상업발전) 이후 개발한 사례가 없었다. 2007.08에 상업발전을 개시한 경기도 연천군 소재의 고문소수력발전소(설비용량 1,500kW, 신에너지(주))는 민간 발전사업자가 한탄강유역의 일반하천에 '93년도 이후 14년 만에 발전사업 허가를 획득하여 한국농촌공사 소유의 농업용 보를 이용하여 개발한 사례이다.

신·재생에너지백서(산업자원부, 2006.08)에 의하면 공해가 없는 청정에너지인 소수력 발전은 1,500MW 정도의 국내 부존량이 있으며, 시장잠재량은 2030년까지 660MW이다. 수력 개발이 가능한 후보지 대상은 다음과 같이 유효저수량 3백만톤, 유역면적 15km<sup>2</sup> 이상의 농업용 저수지, 2만톤/일 이상의 하수종말처리장, 시설용량 5만톤/일 이상의 정수장, 높이가 2m 이상인 농업용 보 등이며 이 같은 미활용 수력 자원을 이용할 수 있는 개발지점은 매우 다양하다. 국내 보급 잠재량이 많은 일반하천을 이용한 수력 개발은 하천에 가동보나 콘크리트 보를 설치하여 하천유지용수와 관개용수 등으로 이용하면서 수상레저와 같은 관광자원으로 개발하면 지역경제에 도움을 줄 수 있으므로 경제성 확보방안을 마련한 적극적인 개발이 필요하다.

소수력 자원의 적극적인 개발은 사장되는 에너지원의 개발 차원뿐 아니라 경제·사회적으로 전력 수요 급증시의 부하 평준화 효과, 석유 수입 대체 및 민간 주도의 반영구적 사업으로서 환경친화적인 에너지원의 개발과 부수적으로 지역개발의 촉진과 경제적 파급효과, 관련기술의 수출 산업화 등의 효과를 거둘 수 있다. 향후 수력발전소의 규모는 점차 작아지고, 기존의 발전소들보다 원거리에 위치하며 개발비용은 점차 증가할 것으로 예상된다. 따라서 주위 환경과 관련된 새로운 기술개발도입과 국가적 차원에서 재정적 지원강화와 개발지점 주변 지역민의 이해와 협력이 필요하다. 특히 이러한 연구의 필요성이 부각되고 있는 현실에도 불구하고 대기업이나 정부공공기관의 소수력 시장에 대한 접근은 매우 더디게 진행되고 있는 것이 현실이다. 정부 시책의 진전을 기다리면서 시장의 조건에 적합한 터빈시스템의 설계 및 최적화를 통하여 시장을 형성시킬수 있는 기본 여건을 조성하는 것이 터빈을 공급하는 설계자의 위치에서 취해야 할 입장이다.<sup>[3],[34]</sup>

Table 1.7 Potential distribution of small hydropower<sup>[3]</sup>

| 구 분                        | 지점수    | 잠재량(kW)   | 특 징                               |
|----------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|
| 일반하천                       | 120    | 1,412,500 | 가동보를 이용한 개발                       |
| 하수종말처리장                    | 63     | 5,300     | 이용율 70~80%                        |
| 수도관로                       | 58     | 2,500     | 이용율 90%                           |
| 농업용 저수지                    | 163    | 48,000    | 저수량 3백만 <sup>3</sup> m 이상 계절 영향 큼 |
| 농업용 보                      | 18,252 | 5,000     | 이용율 40%                           |
| 다목적댐 용수로/조정지               | 6      | 6,744     | 이용율 60%                           |
| 화력발전소 냉각수 이용 및 양식장 순환수, 기타 | 25~30  | 19,956    | 이용기술을 확보하여 건설                     |
| 합 계                        |        | 1,500,000 |                                   |

Table 1.8 The amount of hydropower resources using existing facilities.

| 구 분             | 지점수 | 개발가능용량(kW) | 연간에너지<br>포텐셜(MWh) | 비 고         |
|-----------------|-----|------------|-------------------|-------------|
| 농업용저수지          | 180 | 30,064     | 92,176            |             |
| 농업용보            | 232 | 46,843     | 164,137           | 고무댐 3m 가정   |
| 대댐의 이용          | 20  | 15,800     | 55,363            |             |
| 양식장 이용          | 129 | 8,442      | 66,558            | 유효낙차 6m 가정  |
| 정수장 이용          | 70  | 17,641     | 131,360           | 유효낙차 10m 가정 |
| 하수처리장<br>이용     | 59  | 8,385      | 62,437            | 유효낙차 5m 가정  |
| 화력발전소<br>냉각수 이용 | 6   | 24,122     | 126,785           | 가동율 60% 가정  |
| 합 계             | 691 | 151,297    | 698,816           |             |



### 1.3 연구의 목적

수력자원을 초기에 개발할 때는 대형으로 많은 전력을 생산하기 위한 목적으로 사업을 시작하였으나, 대형 댐의 건설에 따른 환경 문제와 다른 에너지원의 개발 보급 확대에 따라 최근 소수력의 개발은 용량에 구애받지 않고, 청정에너지를 개발할 수 있도록 선진국을 비롯하여 많은 나라에서 시행하고 있다.

특히 최근 유럽 일부국가와 미국의 경우 소수력의 개발은 친환경적인 측면에서 개발을 장려하고 있으며, 요금제도 혜택 및 생산된 전력을 전력판매사에서 적극적으로 구매할 수 있도록 유도하고 있는 실정이다.

IEA(International Energy Agency)는 최근 소수력 시스템의 개발을 지지하고, 효율을 향상하기 위해 기존 시스템을 업그레이드 하는데 주안점을 두고 있다.

전 세계적으로 중·대형 수력자원의 개발이 남아 있는 곳도 일부 있지만, 환경문제 등을 고려할 경우 차후 수력에너지 개발은 소형보다 미니 또는 마이크로 그리고 피코급의 발전이 주류를 이룰 것이다. 소용량의 발전시스템은 환경문제를 최소화하면서 적용 장소에 구애받지 않고 많은 지점에 설치 가능한 특징을 가지고 있어 발전용량의 확대에도 도움이 될 것으로 예상되어 선진국을 중심으로 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다.

현재 국내에서 개발되어 운영중인 소수력 발전소를 보면 기존 시설물이나 신설 시설물에서 사용가능한 최적의 조건에 맞추어 설계를 수행하고 있으며, 다양한 사양의 수차가 사용되고 있는 추세이다.

일반적으로 대형에 비해 소형의 경우 발전기 효율이 낮으며, 제작되는 경우도 적은 편이다. 따라서 점차 낮아지는 수차발전기용량에서 수차와 발전기의 효율을 높이기 위해 첨단 프로그램 등을 사용하여 효율개선에 많은 투자를 하고 있다. 또한 낙차와 유량의 변화에 대응하여 일정한 발전효율을 유지하기 위한 대안으로 가변속 발전기에 대한 개발도 적극적으로 추진되고 있다.

비교적 저렴한 설치비와 제작비용의 장점을 가지는 충동식 수차는 상수도등의 관로중에 설치가 불가능하다. 또한 소수력용 마이크로 발전설비는 건설비용의 절감이 최대의 원가 절감 요인이 되므로 토목이나 건축공사를 최소화 하고 주변 시설물의 형상 변경을 최소화 할 수 있는 형식이 바람직하다. 동일한 기술

수준에서 수자원의 활용이 늘어갈수록 수자원의 입지조건에 부합하는 터빈의 성능은 상대적으로 떨어질 수 밖에 없다. 이를 극복하기 위해서는 새로운 형식이나 형태의 수차를 개발해야 하는 것은 자명한 일이다.<sup>[35]</sup>

이에 본 연구에서는 최근 상업화되어 설치되기 시작한 튜블러 수차의 고성능화 및 현장최적화에 관한 연구를 수행하여 수차발전기의 적용성을 확대함은 물론이며, 다양한 조건에서 가장 안정적인 운용이 가능한 터빈시스템의 기준을 제시하고자 한다.

본 연구의 대상인 튜블러 수차는 기존의 벌브 수차와 비슷한 개념에서 출발하였으며 수차의 유지보수성, 냉각에 따른 에너지 생산성등을 고려하여 발전기를 수차의 외부에 설치하였다. 또한 수차와 발전기를 직접 연결하지 않고 벨트를 통하여 동력이 전달되어 발전이 되도록 구성되어 있다.

다른 형식의 수차와 비교하여 각 수차의 구성에 각각 장·단점을 가지게 되지만 최근의 수차발전소 건설 현황이나 남아있는 발전 가능지점의 수력학적 특성을 고려할 때 빠른 시간내에 성능의 최적화 및 광대역화를 통하여 시장의 활성화 및 상품화를 위하여 개발이 완료해야할 필요성이 있는 발전시스템이다.

본 연구에서는 튜블러 수차의 사용영역을 실험과 수치해석을 통하여 검증하고 설계의 기준을 확립하여 소수력 발전용 튜블러 수차시스템을 완성하고자 한다. 검증을 위해서는 먼저 각 지점의 설치 조건을 분석하여 설계조건을 완성해야 한다. 다음으로 수차발전시스템의 제작, 현장 설치 및 운전을 통하여 그 결과를 피드백하는 절차를 밟게 될 것이다.

본 연구에서는 크게 세가지의 영역으로 구분하여 수차의 선정가능 범위를 결정하고, 여기에 따른 수차의 운전특성 및 설치 조건을 검토하여 최종적으로 표준화된 수차의 형식을 결정하게 될 것이다.

동일한 형식을 취하면서 유량과 낙차의 조건에 따른 러너를 포함한 구성품의 크기 차이를 통한 표준화를 완성한다. 이어서 표준화된 절차에 따라 상세 설계 및 제작, 설치의 과정을 수행하여 투자비의 경감을 이끌어 내는 것이 본 연구의 최종 목표이며, 연구의 최종 결과는 유량과 낙차의 조건에 따라서 표준화된 소수력 발전용 튜블러 수차의 선정도가 될 것이다.



## 제2장 소수력 발전용 수차의 선정 및 검토

### 2.1 수차의 선정

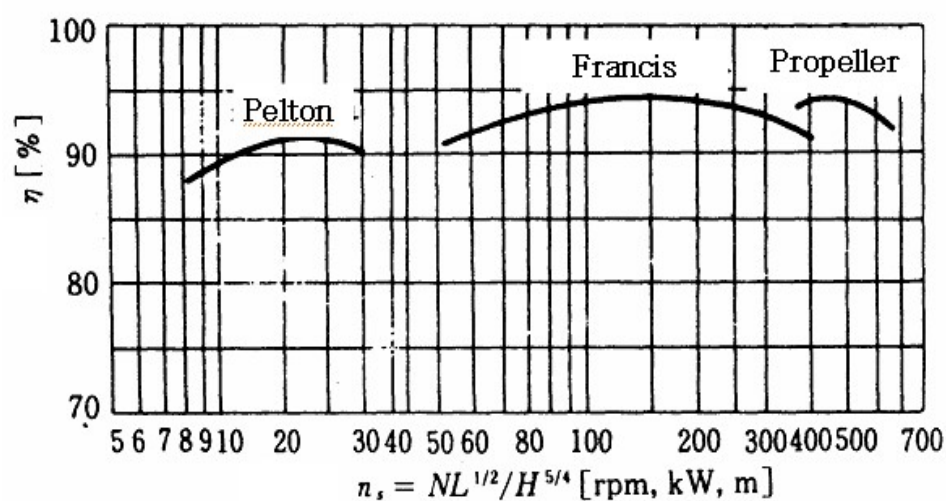
일반적으로 소수력 발전소를 건설함에 있어서 수차발전기를 설치하기 위해서는 수차에 대한 사양을 먼저 결정하고 난 이후에 발전가능 지점을 선정하는 것이 아니라 설치하고자 하는 지역을 선정한 후, 그 지역의 유량, 수두 등의 발전량 결정 요인을 검토한 뒤 최적의 효율을 가지는 수차를 선정한다.

일반적으로 소수력 발전소 설계를 위하여 수행하는 절차는 다음과 같다.

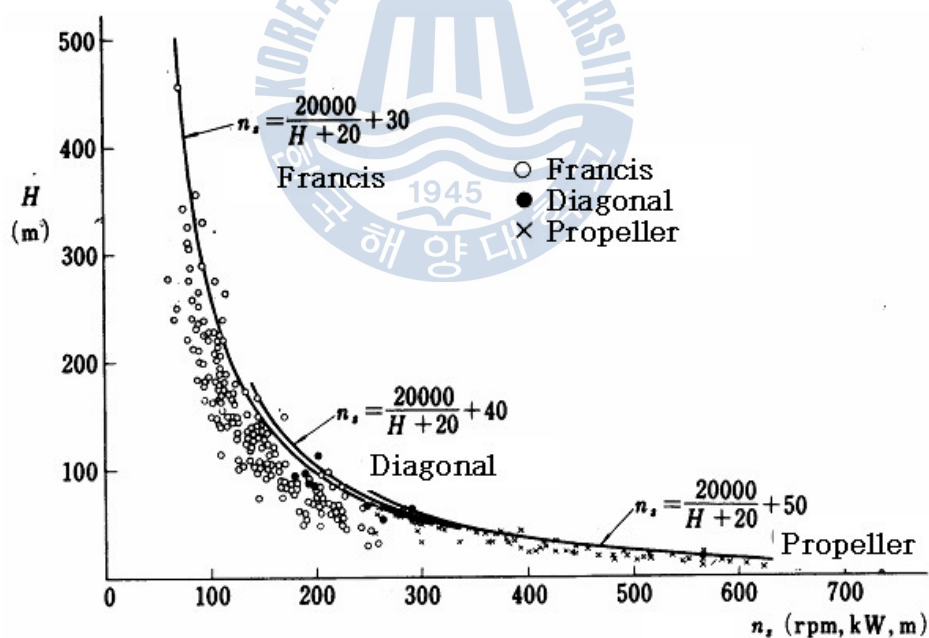
#### 1) 먼저 설치 지점의 조건을 확인한다.

유효낙차(H), 유량(Q)조건을 근거로 한 수차의 형식 선정을 의미하며, 이를 근거로 하여 비속도, 효율을 산정한 뒤 수차의 형식을 선정한다. Fig.2.1에서는 일반적으로 수차를 설계할 경우 사용하는 수차를 선정을 위한 비속도 구간을 보이고 있다. 수차의 종류나 사양을 고려하지 않는다 하더라도 Fig.2.1에 보이는 비속도 구간을 벗어나는 수차를 선정하게 되면 캐비테이션이나 진동의 발생을 초래하게 될 것이다. 특히 튜블러 수차의 경우 벨브 수차와 동일한 형식조건으로 고려하여도 무방하므로 벨브 수차의 사용영역 범위에서 선정될 수 있도록 한다.

#### 2) 설치 지점의 조건을 확인하여 프로펠러 터빈의 영역에 속하는 튜블러 수차를 적용하는 것으로 결정되었다면 유량의 변동 범위를 결정하여 수차의 대응 범위를 결정하여야 한다. 일반적인 정수장, 하수처리장, 공장의 배출수등을 포함한 발전지점의 경우 시간별, 계절별 유량의 변화가 발생하게 된다. 더하여 유효낙차의 변동까지도 포함된다면 러너 베인의 개도 변경이 가능한 형식을 선정할 것인지 아니면 가이드 베인의 개도 변경으로 대응을 할 수 있는지를 확인해야 하며, 필요시 가이드 베인과 러너 베인 모두를 장착해야 할 경우도 발생할 것이다.



(a)



(b)

Fig.2.1 Table for characteristics of turbine

3) 유량과 낙차의 제어 범위가 결정되었다면 날개 수를 결정한다.

벌브터빈을 포함한 프로펠러 수차의 경우 3,4,5매의 날개를 사용하며 고낙차 일수록 날개의 수량은 증가시켜 대응하고 저낙차에 가까울수록 날개수를 줄여서 사용한다. 특히 벌브수차의 설계에 있어서는 날개 1매에 대하여 2.5m~5m의 낙차가 되도록 설계하는 경우가 대부분인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 날개 4매와 5매로 고정하여 소수력 발전 지점의 조건에 따라서 적절하게 운용하도록 구성하였다. 유효낙차를 기준으로 10m를 초과할 경우 5매, 이하일 경우에는 4매를 적용하는 것으로 한다. 또한 벌브 터빈이나 프란시스 터빈등에서는 가이드 베인을 이용하여 배관내 이상이 발생할 경우 수차발전기 보호를 위한 급 폐쇄 시스템을 구성하고 있다. 기 제작되어 설치된 적용사례와 선행 연구조사에 따르면 가이드 베인은 거의 대부분 16매로 결정되어 있으므로 본 연구에서도 가이드 베인을 16매로 설계하는 것을 전제로 하였지만, 지점의 조건을 확인하여 채용 여부를 선택하는 것을 최종 목표로 하는 것이 합리적이다. 하지만 본 연구에 적용된 튜블러 터빈에서는 소형화에 따른 비용 절감을 위하여 수차의 구성에서 제외하는 것으로 결정한다.

4) 낙차범위와 날개 매수가 결정되었다면 러너의 공칭외경( $D_1$ )과 수차의 회전수( $n$ )를 결정한다. 러너의 공칭외경이 결정되어야 수차 케이싱의 규격 및 허브의 규격, 기타 구성부품의 개략적인 크기가 결정된다. 특히 러너의 공칭외경과 허브의 크기를 결정하는 문제는 추후 수차의 케비테이션, 효율등에 직접적으로 영향을 끼치게 되므로 중요한 사항이 된다. 최근 벌브 터빈등이 적용된 대수력에서는 효율이 저하되는 문제점이 발생하지만 친환경적 요인을 고려하여 날개의 매수를 줄이고 허브와 날개의 폭을 줄여서 설치하는 사례도 늘어나고 있다. 하지만 소수력용 튜블러 수차의 발전량이나 사용상의 특징을 고려하여 보았을 때, 효율을 최대한 보증 할 수 있는 방향으로 설계를 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

5) 설치지점의 통수량을 감안한 배관규격과 위의 계산식에 근거하여 수차의 케이싱 구경, 날개의 열림 각도조절 범위 등의 변수를 결정한다. 튜블러 수차와 같은 고비속도 수차에서는 러너의 출구 속도가 유효낙차에 많은 영향을

미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 주로 직선의 원형관에 사용되는 튜블러 수차의 경우 흡출관쪽의 선회류나 압력의 손실을 막기 위하여 흡출관(draft tube)의 선정 시 충분한 검토에 근거하여 결정되어야 한다.

이상과 같이 살펴본 절차에 따라서 설치지점에 최상의 효율가치를 보이는 수차의 형식은 선정되어야 한다. 본 연구의 대상인 소수력 발전용 튜블러 수차의 경우 Fig.2.2에 보이는 것과 같이 대용량 벌브 수차와 같은 형상으로 제작되고 있으며, 벌브수차의 성능테스트를 위한 모형수차 제작시 사용되는 모델수차와 거의 동일한 형상을 가지고 있다. 정수장 시설물이나 양식장의 방류수, 폐수처리장의 방류수등에 관 시설물을 이용하여 발전소를 건설에 적용될 수 있는 수차 형식은 Table 2.1에 보이고 있다. 또한 이러한 수차 형식에 대하여 이미 사용자들에게 널리 알려진 수차의 형식 선정도를 Fig.2.3에 보이고 있다. 본 연구에서도 유효낙차 2m ~ 20m 범위에서 사용가능한 것으로 알려져 있는 튜블러 터빈을 적용하여 국내 환경에 적합한 터빈 시스템으로 개발할 수 있는 설계법을 확립하고, 국내에서 활발하게 적용성을 검토하고 있는 현장에 적합한 최적의 수차시스템을 개발하고자 한다.

특히, 유효낙차 20m 이하 조건에서 관 시설물을 이용한 수차의 1기당 최대출력은 300kW를 넘지 못하는 것이 대부분이며, 그나마 이러한 조건을 만족하는 발전지점은 국내에 남아있는 곳이 없는 실정이다. 따라서 최근의 현황은 100kW, 심지어는 10kW급에 이르는 발전지점을 개발하기 위하여 조사를 수행하고 있다. 하지만 이러한 발전지점의 조건에 적합한 터빈의 개발은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 튜블러 수차의 경우 러너의 개도 변경으로 일정한 범위 조건에서는 동일한 효율특성으로 설치 지점의 변경된 조건을 만족시킬 수 있는 장점이 있다. 배관 상에 설치될 튜블러 수차는 구조적으로 기존에 존재하는 파이프라인의 특정 구간에 바이패스 라인을 설치하여 수차발전기를 설치하는 구조를 취한다. 이러한 장점으로 인하여 수차의 표준화가 가능하며, 일정한 영역의 범위 내에서는 동일한 수차로 최적의 효율을 보일 수 있는 조건을 수차시스템이 입력 조건에 대한 판단을 수행하여 수차 설비의 조정이 가능하다.

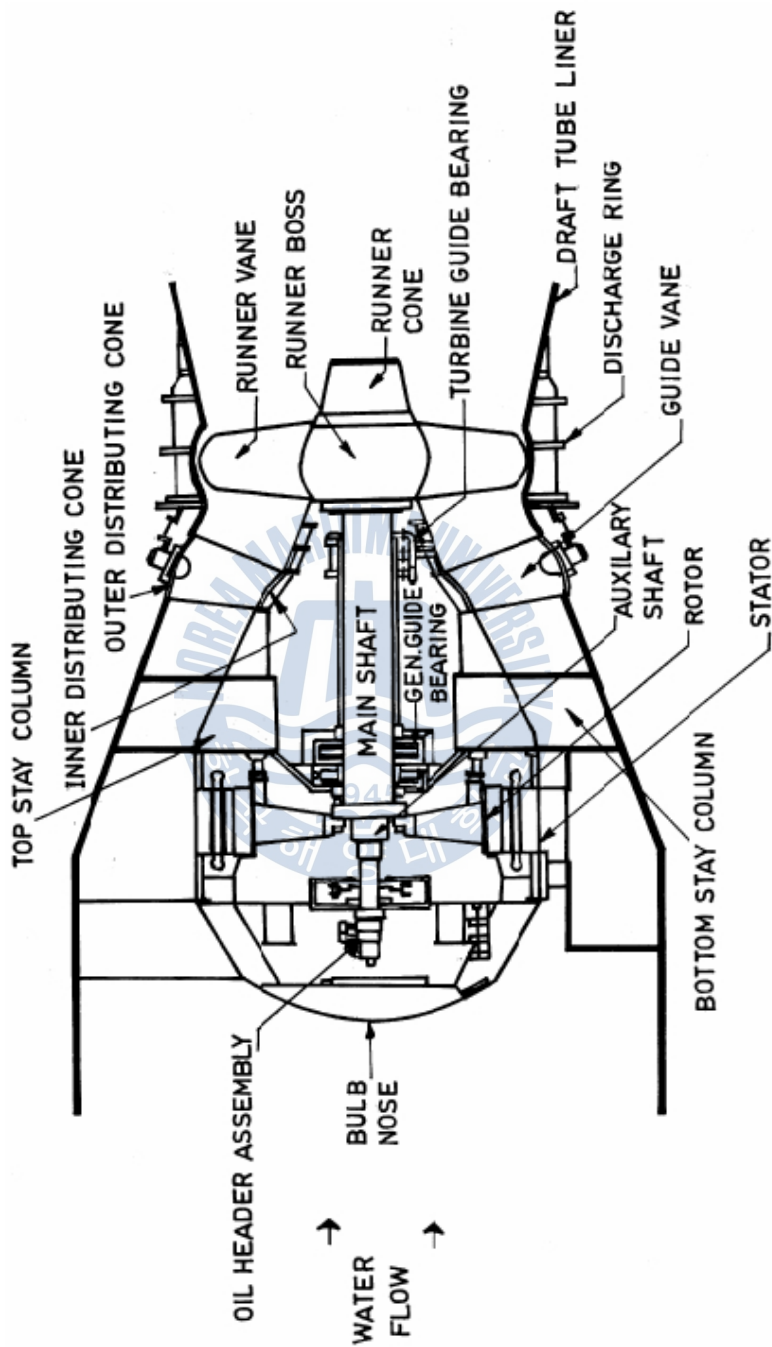
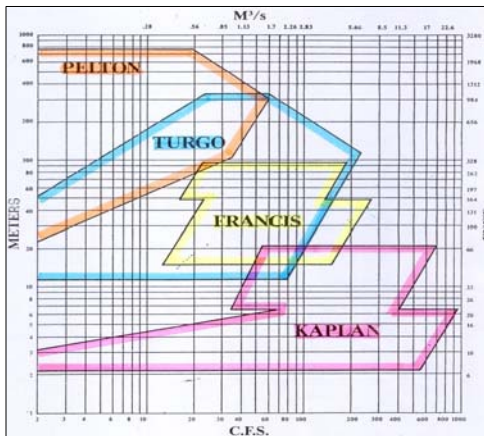
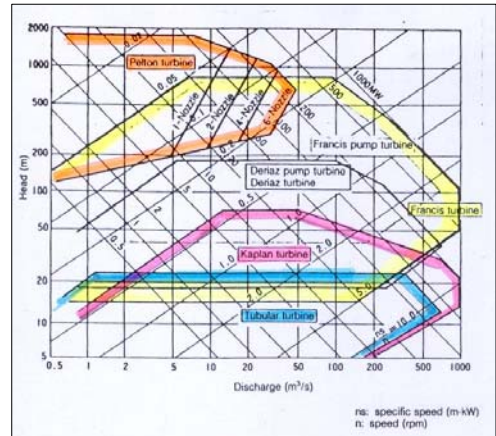


Fig.2.2 Shape of bulb turbine

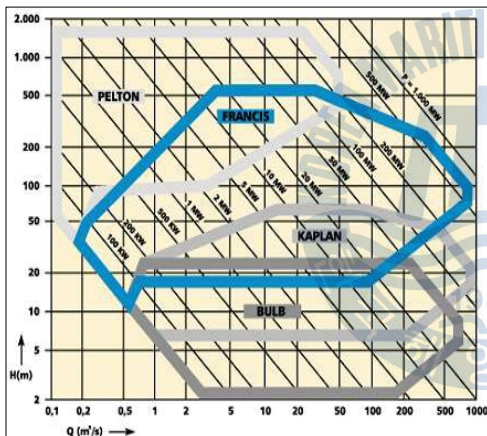




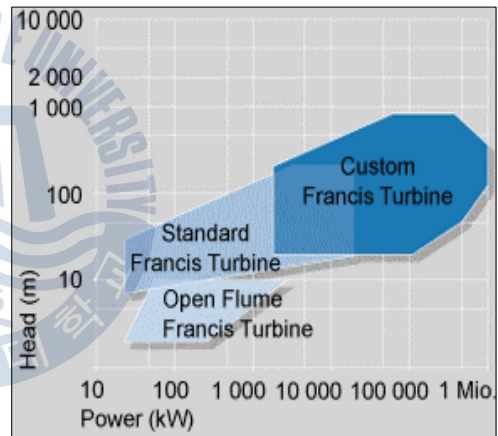
(a) Dependable



(b) Mitsubishi



(c) Hitachi



(d) Voith Hydro

Fig.2.3 Shape of bulb turbine

Table 2.1 Applicable type of turbine

| 수차형식 \ 제작사 | Dependable | Mitsubishi | Hitachi | Voith Hydro |
|------------|------------|------------|---------|-------------|
| Francis 수차 | ○          | ○          | ○       | ○           |
| Kaplan 수차  |            |            | ○       |             |
| TUBE 수차    |            | ○          | ○       |             |



## 2.2 소수력 발전용 수차의 기본 구조

저낙차에 주로 사용하는 프로펠러 수차는 근래에 튜브형, 벌브형, 림형 수차등으로 구분 제작되어 제작사들의 표준화된 사양으로 그 이름이 붙여지고 있다. 본 연구의 적용대상인 튜블러 수차의 기본 구조는 Fig.2.4에 보이고 있으며, 발전기는 수차의 외부에 설치되어 수차회전축과 벨트로 연결되도록 구성되어 있다. 수차의 주요 특성을 나타내는 날개의 열림 각도 변경은 웜기어에 직결된 서보모터를 이용하여 구동하며, Fig.2.5에 그 구조와 동작원리에 대하여 간략하게 보이고 있다. 지금까지 국내에 적용되어 있는 카플란수차나 프란시스수차의 경우 날개의 개도나 가이드 베인의 동작을 위한 기본 에너지원은 유압을 이용한 실린더 장치였다. 하지만 튜블러 수차에서는 날개의 열림 각도의 조정을 위하여 Fig.2.5에 보이는 것과 같이 서보모터가 웜샤프트를 회전시키면 웜휠이 슬라이드탭을 전·후진시켜 날개에 장착된 링크에 의해 날개의 개도가 변경되는 방식을 취하였다. 날개의 개도변경은 서보모터의 지령에 의해 변경되며, 지령 값은 유량, 회전속도 및 입구와 출구의 차압, 출력 값에 의하여 결정된다. 수차 날개의 열림 각도의 크기를 서보모터 구동을 통하여 자동으로 조절하는 기능은 수차의 효율을 상승시킨다는 의미보다는 수차를 최적의 조건에서 최상의 효율을 유지하면서 구동할 수 있도록 조건을 맞추어 운전한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 서보모터의 회전수에 비례하여 날개의 개도를 결정할 수 있도록 구성하였으며, 설치 시운전 후 각 개도별 출력 및 효율 사항을 확인하여 최적값을 할당할 수 있도록 구성하였다. 이러한 구성은 설계데이터와 설치 운전데이터에 차이가 발생할 경우 손쉽게 수차의 운전조건을 변경시킬 수 있는 장점을 가진다. 날개를 포함하여 형상을 포함한 수차에 대한 설계 표준 연구는 이미 국외의 연구자들에 의하여 많은 부분에 대한 성능검증이 이루어진 상태이다.<sup>[36]~[39]</sup> 특히, 본 연구의 초기단계에서 Fig.2.6과 Fig.2.7에 보이는 것과 같이 튜블러 수차의 5kW급 모델 실험 및 CFD를 통하여 베인의 개도별 통수량을 결정하였으며 이를 토대로 상업용 수차의 설계에 관한 절차를 일부 수립한 단계에 이르렀다. 날개의 형상 및 수차 내부의 형상, 가이드베인의 장착여부 등에 대한 검토를 수행하여 다음과 같은 절차를 완성하였으며, 본 연구에서는 이러한 절차에 의해서 설계를 거치고 제작된 수차를 각 지점에 설치하여 그 성능을 검증하는 방식을 취하였다.

특히 수차의 성능을 고려하여 지금까지 프란시스나 카플란 형식의 수차에 적용되었던 가이드베인은 본 수차의 설계시 삭제하였다. 날개의 개도가 변경되는 시스템을 사용할 경우 가이드 베인의 개도 변경에 따른 시스템 효율의 변화는 미미한 것으로 이미 보고되어 있다. 특히 이러한 두 시스템의 혼합 사용에 따른 성능의 차이를 Fig.2.8와 같이 선행 연구사례에서 보이고 있다. 상업적인 목적을 염두에 둔 본 연구에서 수차발전기의 제작비용 상승 및 부대설비의 추가로 인한 발전설비의 유지보수비용 증가로 이어진다. 다양한 형식으로 제품화되고 있는 소수력용 수차발전기의 형식에서 날개 가변형 튜블러 수차를 적용할 경우 가이드 베인 가변에 따른 성능보증치 보다 뛰어난 성능 변동 특성을 가질 뿐 아니라, 효율적으로 에너지 생산이 가능하므로 수차 구조의 단순화를 위하여 본 수차 시스템에서 제거하게 되었다. 날개 유입구측의 정류 시스템은 가이드베인을 대신하여 구조용으로 사용되는 스테이 베인을 이용하여 수차의 내부를 구성하였다. 특히 발전설비의 설계시 적용되는 정격지점에서의 날개 개도를 결정하고, 이에 따라서 가이드 베인의 개도를 결정하여 제작할 경우 정류기능이 추가되어 수차의 효율 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.<sup>[40]-[44]</sup>

실제 수차에 가이드 베인을 적용한 경우와 삭제한 경우의 형상을 Fig.2.9에 보이고 있다.

또한 날개와 맞닿아 있는 Discharge ring의 경우 구면형상으로 날개의 팁 부위와 만나게 될 것인지 아니면 원통형으로 만날 것인지에 대한 결정도 수행하여야 한다. 날개 개도의 변경으로 인하여 Discharge ring과 날개 간의 간격은 조금씩 달라지게 되는데, 이러한 틈새를 가장 효율적으로 줄일 수 있는 구면형성이 효율증대에 영향을 미칠 것으로 보이며, 제작상의 문제점으로 나타날 수도 있다. 본 연구에 적용된 튜블러 수차에는 인입측을 원통면으로 구성하고 날개와 맞닿는 부분은 구면으로 구성하였다.

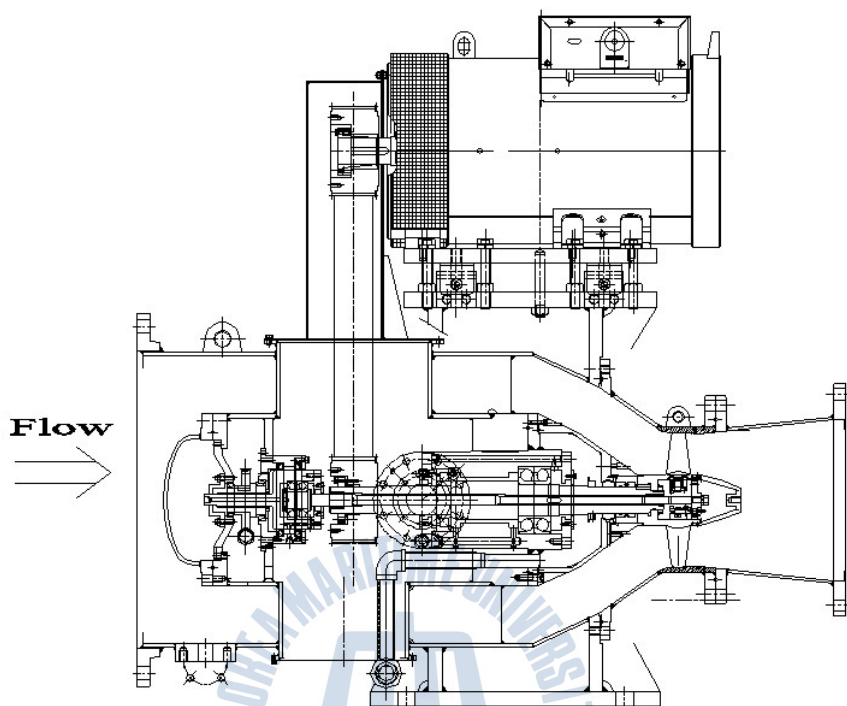


Fig.2.4 Drawing of test tubular turbine

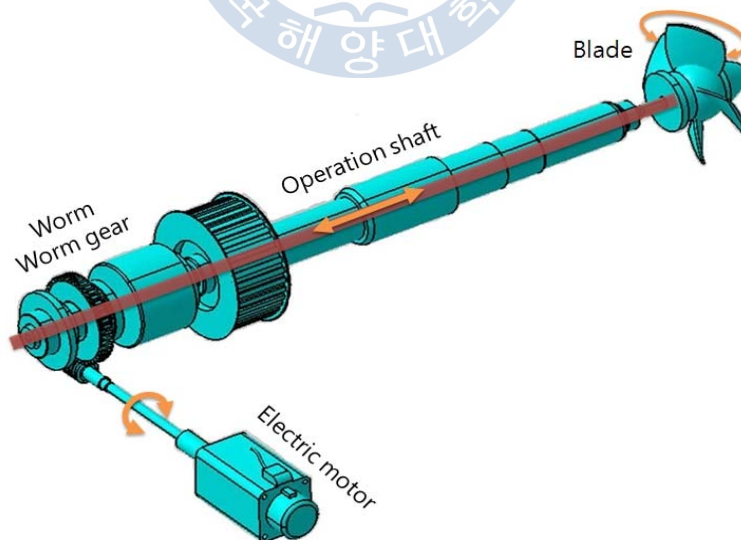


Fig.2.5 Conceptual view of runner vane control system

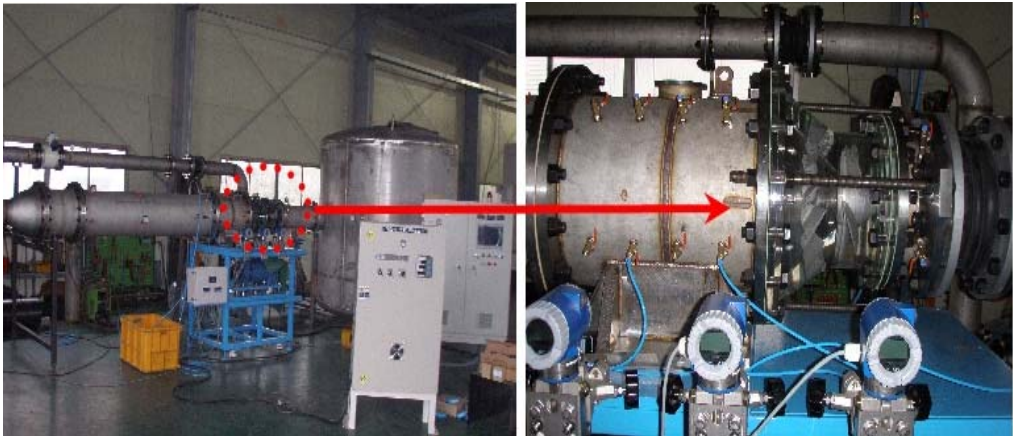


Fig.2.6 Installed turbine system for test in 5kW class

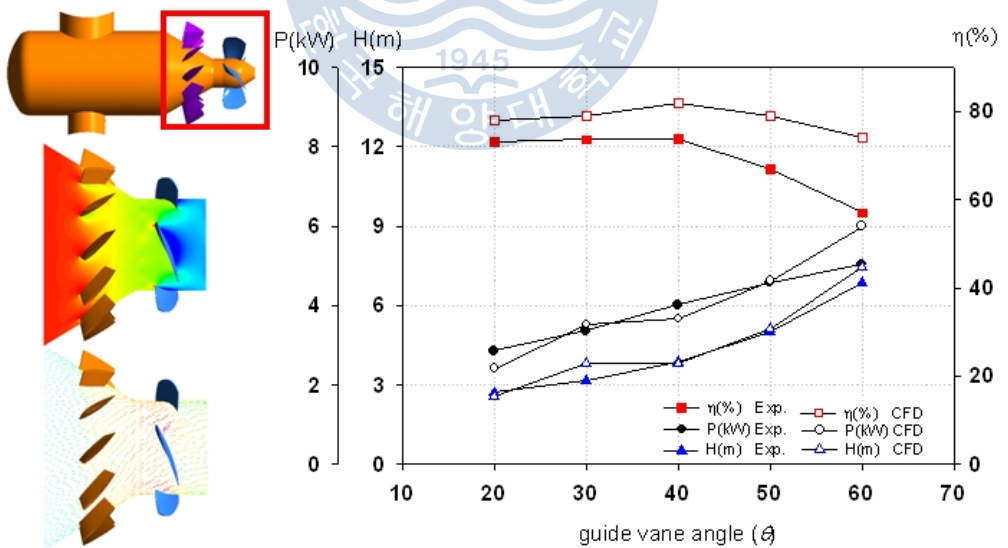


Fig.2.7 Results of test using CFD in 5kW class

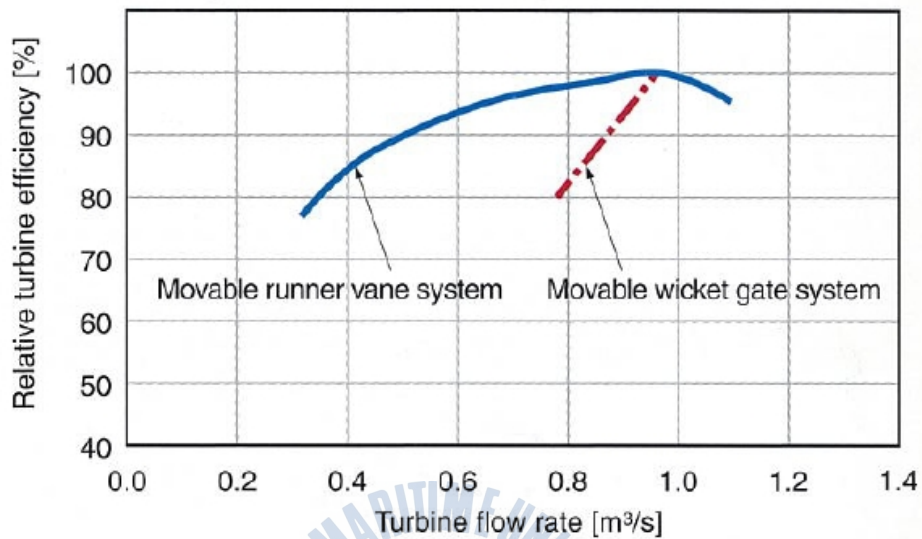


Fig.2.8 Comparison of efficiency between different movable systems (Fuji electric system. JAPAN)

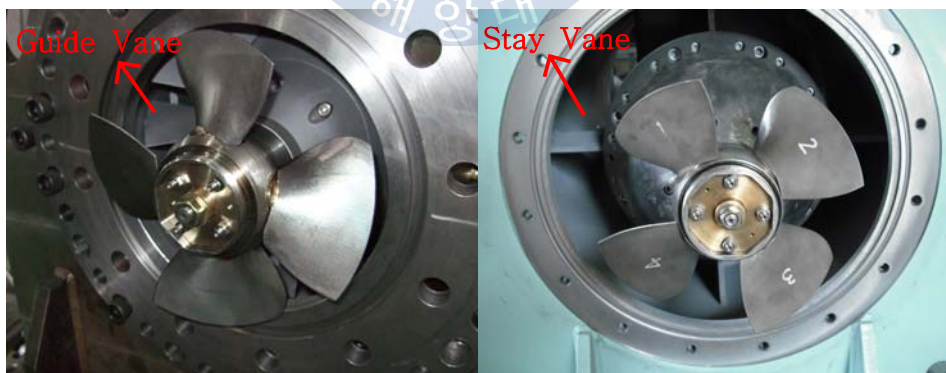
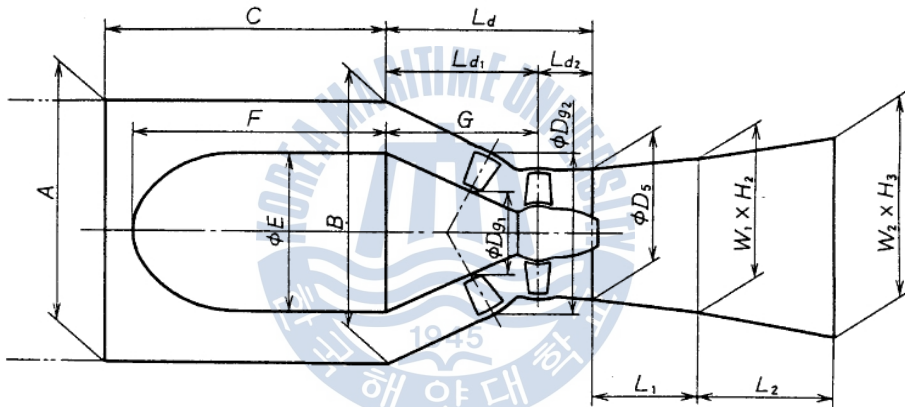


Fig.2.9 Comparison of systems based on the presence of guide vanes



## 2.3 설치 조건에 따른 튜블러 수차의 설계 검토

국내에는 아직 소수력 발전용 수차에 대한 KS 규격이나 시험, 제작등에 대한 명확한 절차가 수립되어 있지 않다. 단지 Fig.2.10에 보이는 것과 같이 KS B 6018 수차 및 펌프 수차의 모형 시험 방법에 명기된 수차의 치수 검사 위치도에 적합한 검사 조건만이 명기되어 있을 뿐이다. 따라서 본 연구에 적용된 수차는 일본 전기표준규격조사회 표준규격인 JEC-4003에 명기된 수차 및 펌프 수차의 치수검사 절차를 토대로 설계 및 제작에 관한 검토를 수행하였다.



| 항 목        |            | 기 호                    |
|------------|------------|------------------------|
| 유 로        | 안벽면 치수     | $A, B, C$              |
|            | 밸브 바깥벽면 치수 | $E, F, G$              |
| 안 내 기      | 안쪽 피치원 지름  | $D_{g1}$               |
|            | 바깥쪽 피치원 지름 | $D_{g2}$               |
| 디스차지 링부 길이 |            | $L_d (L_{d1}, L_{d2})$ |
| 흡 출 관      | 수평 길이      | $L_1, L_2$             |
|            | 압구 안지름     | $D_s$                  |
|            | 수직 높이      | $H_1$                  |
|            | 출구 높이      | $H_2, H_3$             |
|            | 출구 나비      | $W_1, W_2$             |

Fig.2.10 Inspection point of propeller turbine



또한 이와는 별도로 수차를 구성하는 각 기계기구의 개별 설계를 수행하였으며 동력전달 구성품, 베어링, 날개 개도 조작기구, 웜기어와 서보모터등 주요한 몇 가지 인자는 다음과 같이 결정 되었다.

1) 동력전달 구조의 결정 및 계산

수차에 적용될 날개의 직경 :  $D_1$

수차 날개의 스토틀경 :  $D_4$

수차 날개 보스의 직경 :  $D_B$

폴리의 선정 :  $n_G/n_T$

수차축의 강도 :  $T_T$

날개 취부의 강도 :  $\tau$

한쪽둥근사각키이의 면압 :  $\sigma_p$

수차 날개 수추력 :  $W_T$

수차 날개 개도 조절용 서보모터의 일량 :  $A_1$

날개 조작력 :  $F_{NOR}$

날개 개폐시 조작력 :  $F_{MAX}$

$$\tau = \frac{T_T \times 16D}{\pi(D^4 - d^4)}$$

$$\sigma_p = \frac{T_T}{D/2 \times 0.5 \times 2.2}$$

$$\text{O-RING부의 인장응력} : \sigma_t = \frac{W_T + F_{NOR}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}$$

$$\text{날개 개폐 시 o-ring부의 인장응력} : \sigma_t = \frac{W_T + F_{NOR}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} 3 \sim 7$$

$$\text{암나사부의 인장응력} : \sigma_t = \frac{W_T + F_{NOR}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}$$

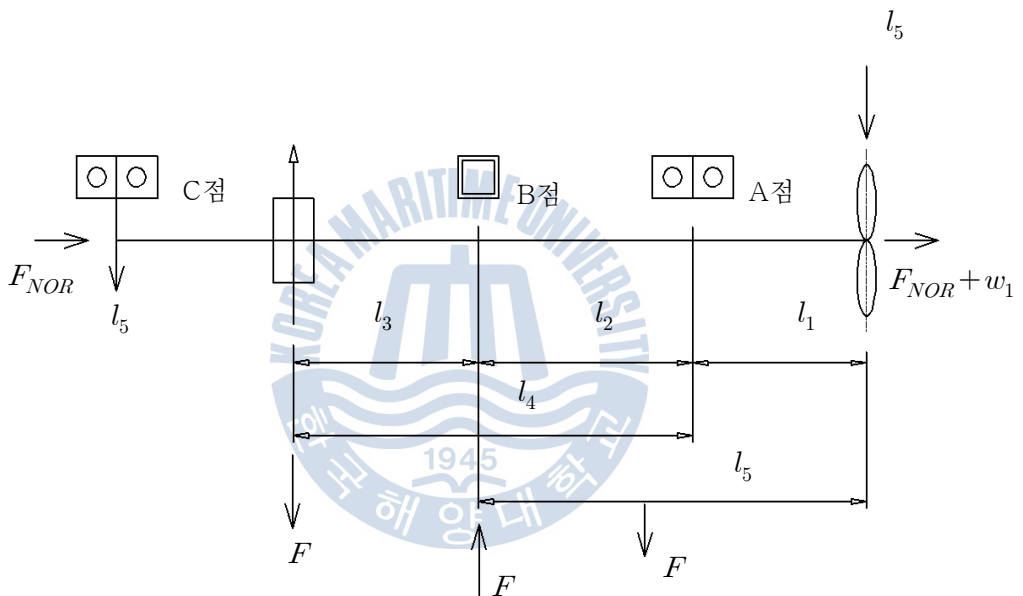
$$\text{날개 개폐 시 암나사부의 인장응력} : \sigma_t = \frac{W_T + F_{NOR}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}$$

날개 나사부의 전단응력 :  $\sigma_s = \frac{W_T + F_{NOR}}{\pi D t}$

날개 개폐 시 날개 나사부의 전단응력 :  $\sigma_s = \frac{W_T + F_{NOR}}{\pi D t}$

## 2) 베어링의 선정과 수명

선정기준으로서, 내용년수 5년 이상 및 베어링 메이커에 의한 피로수명 계수  $f_h$ 의 값이 4이상으로 한다. (소형전동기, 대형전동기 겸용)



A점의 조합 앵글러 볼베어링

속도계수  $f_n = \left( \frac{10^6}{500 \times 60 \times n_T} \right)^{\frac{1}{3}}$

피로수명계수  $f_h = f_n \frac{C_r}{P}$

내용년수는 베어링 제조사의 권장사항인 5년으로 선정한다.

피로수명  $L_h = \frac{10^6}{60 n_T} \left( \frac{C_r}{P} \right)^3$

B점의 롤러 베어링

$$\text{속도계수 } f_n = \left( \frac{106}{500 \times 60 \times n_T} \right)^{\frac{3}{10}}$$

$$\text{피로수명계수 } f_h = f_n \frac{C_r}{P}$$

$$\text{피로계수 } L_h = \frac{10^6}{60n_T} \left( \frac{C_r}{P} \right)^{\frac{10}{3}}$$

C점의 조합 앵글러 볼베어링

$$\text{속도계수 } f_n = \left( \frac{10^6}{500 \times 60 \times n_T} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{피로수명계수 } f_h = f_n \frac{C_r}{P}$$

내용년수는 베어링 제조사의 권장사항인 5년으로 선정한다.

$$\text{피로수명 } L_h = \frac{10^6}{60n_T} \left( \frac{C_r}{P} \right)^3$$

3) 수차 날개 조작기구의 강도

$$\begin{aligned} \text{수차 날개 조작 너트부의 인장응력 : } \sigma_{t_{\max}} &= F_{MAX}/A \\ \sigma_{t_{\text{nor}}} &= F_{NOR}/A \end{aligned}$$

$$\text{수차 날개 조작부의 좌굴하중 : } P = \frac{fA}{1 + \frac{a}{n} \left( \frac{l}{k} \right)^2}, \quad P > F_{MAX}$$

$$\text{수차 날개 조작 너트의 강도 : } \sigma_{t_{\max}} = F_{MAX} \times \frac{1}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$\text{수차 날개 조작 너트의 마찰토크 : } T_{\max} = \frac{F_{MAX} \cdot d(\cos 15^\circ \times \tan \alpha + \mu)}{2000(\cos 15^\circ - \mu \times \tan \alpha)}$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{피치 } mm}{\pi \times \text{유효직경}}$$

$$\text{양쪽 둥근 키이의 면압 : } \sigma_{p_{\max}} = T_{MAX/R} \times \frac{1}{a \times b}$$

베어링 지지 설치부 케이싱판의 강도 :  $\sigma_{MAX} = \beta_{10} \times \frac{F_{MAX}}{t^2}$

$$\delta_{max} = \alpha_{10} \times \frac{F_{MAX} \cdot a^2}{Et^3} \quad (\text{스토퍼 일 때 } 0.014\text{mm})$$

베어링 지지부의 강도

$$\sigma_{max} = \beta_{10} \times \frac{F_{MAX}}{t^2}$$

$$\delta_{max} = \alpha_{10} \times \frac{F_{MAX} \cdot a^2}{Et^3}$$

설치볼트의 인장응력 :  $\sigma_t = F_{MAX}/A \times n$

커플링 너트의 인장응력 :  $\sigma_t = F_{MAX}/A$

열림 스톱퍼의 설치 볼트의 인장응력 :  $\sigma_t = F_{MAX}/A \times n$

#### 4) 워م 기어와 서보모터 관계 검토

웜 휠의 소요출력 :  $N_G$

웜 휠의 회전수 :  $n$

소요토크 :  $T$

$$N_G = \frac{T \times n \times 2\pi \times 9.8 \times 10^{-3}}{60}$$

웜의 소요출력 :  $N_W$

전동효율 (기동시) : 40%

$$N_W = N_G / 0.4$$

서보모터의 출력은 기동효율 30% 이상으로 결정한다.

$$N_M = N_W / 0.3$$

이와 같이 네 부분으로 구분하여 주요 구조 및 기능수행에 필요한 검토를 완료하였으며, Fig.2.11에 보이는 형상으로 기본 구조를 결정하였다. 추후 검토를

수행하면서 수차의 출력과 날개의 크기가 결정되면 상기의 검토식에 준하여 수차의 상세 설계를 진행할 수 있도록 하였다.

Fig.2.12의 일본내 주요 제작사에서 제시한 수차 선정도표를 근거로 일본에서 개발하여 운용하고 있는 사례를 살펴보면 튜블러 수차의 경우 유효낙차 2m이상 20m이내의 범위에서 사용을 권장하고 있는 것으로 보인다. 하지만 국내에서는 수차의 사양을 고려하지 않는다 하더라도 일본과 같이 다양하게 적용된 사례가 없다. 따라서 선정된 지점에 대한 수차의 설계에서부터 제작 및 성능평가에 이르는 과정에 대한 설계 절차를 마련하여 소수력용 마이크로 튜블러 수차의 성능향상 및 현장최적화를 통한 수차의 상업화에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 본 연구에서는 20m 이내의 범위를 저낙차 지점과 중낙차, 고낙차 지점으로 구분하여 수용 가능한 효율변동 범위내에서 유효낙차의 사용영역 구분을 목표로 하였다. 특히 소수력 지점의 설계에 있어서 표준화된 설계 방식이나 규격화된 수차를 적용하여 발전소를 건설하는 사례는 매우 드물며, 사용자측의 승인이 거의 불가능한 것이 시장의 특성이다. 이러한 시장의 특성에 비추어 선진사례에서 알려진 것과 같이 3가지 형식으로 표준화하여 실용화 하는 것은 수차발전기의 효율보증 측면에서 대응이 용이하지 않은 것이 현실이다. 따라서 본 연구에 적용될 세 지점의 구분을 위한 경계낙차로 5m와 15m를 설정하여 특성을 각각 분석하고, 적용 조건은 더욱 세분화하여 5개의 사양을 결정하여 국내 소수력 발전용 튜블러 수차의 상업화에 목적을 두고자 한다. 또한 배관라인 상에 설치될 튜블러 수차의 경우 사용낙차와 시설물의 설치 형태에 따라서 직렬연결 사용을 응용하여 고낙차에 대응을 하기도 하며, 병렬연결 사용을 이용하여 유량의 배분을 수행하기도 한다. 따라서 언급한 경계조건을 만족하는 낙차 조건으로 구분하여 수차의 형식을 결정한 뒤 특성 분석을 수행하였다. 본 장에서는 소수력 발전소 건설에 필요한 주변 환경요인에 대한 조사 및 분석을 수행함과 동시에 수차의 선정 및 상세 설계를 위한 절차를 확인하고 요건을 확인 및 검토하여 수차 선정에 따른 상세설계를 수행하였다.

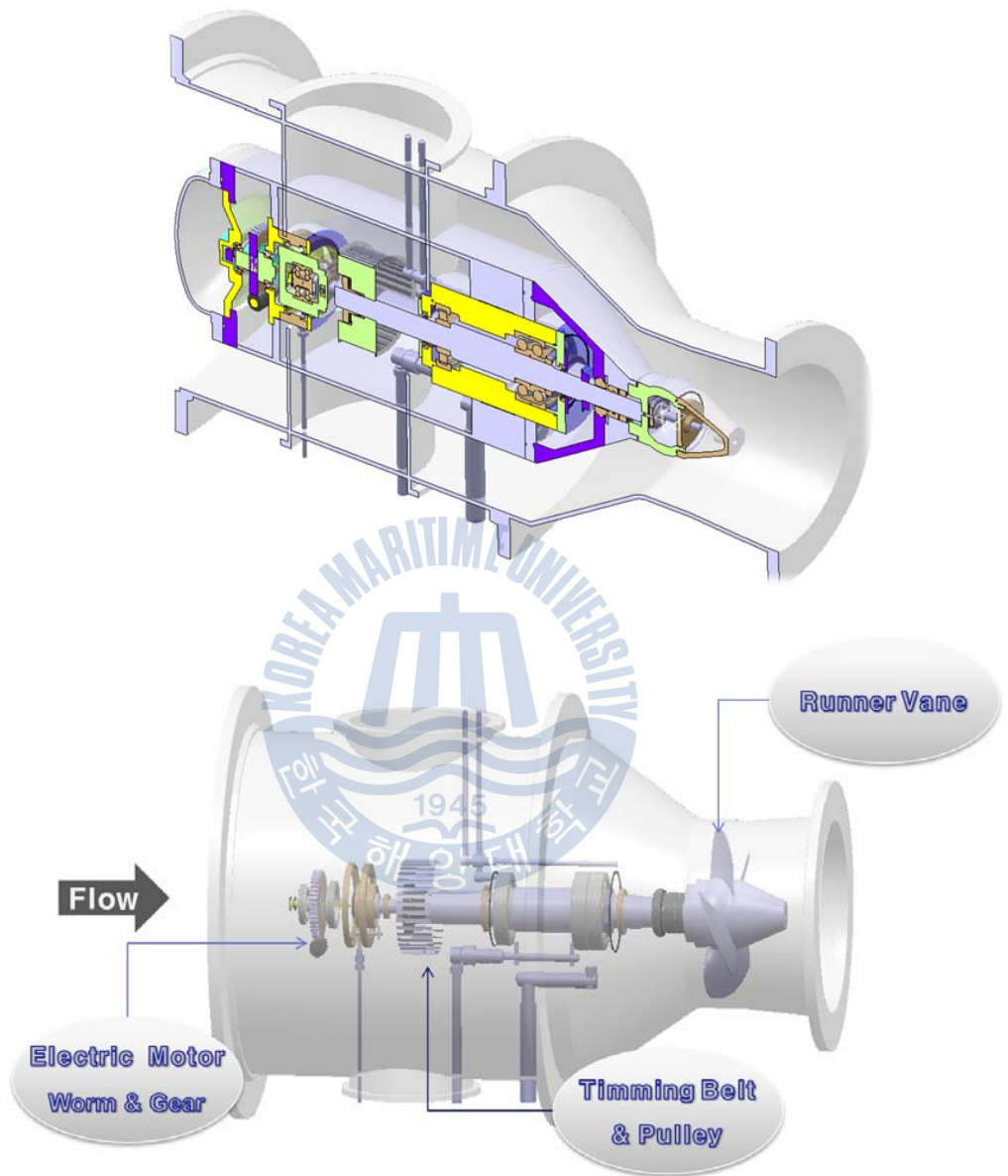
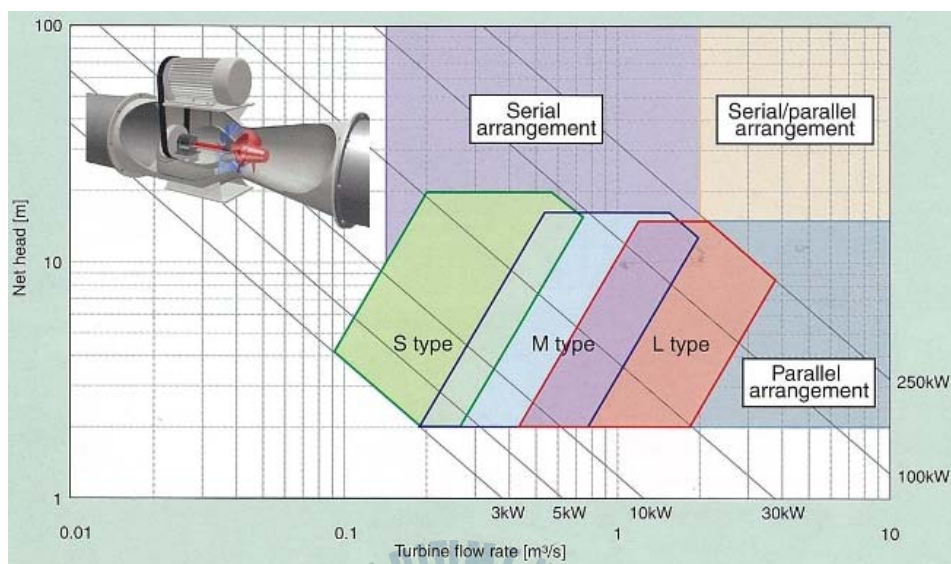
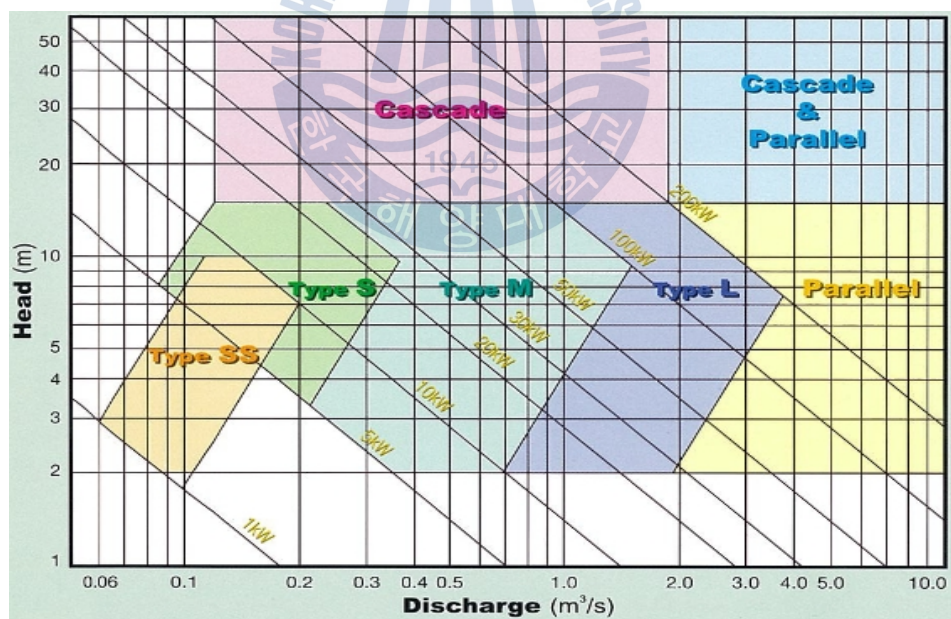


Fig.2.11 Schematic view of tubular turbine





(a) FUJI Electric - Japan



(b) TOSHIBA - Japan

Fig.2.12 Hydraulic turbine type selection table

### 2.3.1 저낙차 조건 ( $H < 5m$ )

제주도 및 남해안 일원에 산재해 있는 어류양식장에서 사용 후 방류되는 배출수를 활용한 해양소수력 발전소의 적용하여 발전소를 건설함으로써 환경오염 최소화를 위한 청정에너지를 개발하는 한편 제주특별자치도의 정책에 부응하고 신재생에너지공급의무화(RPS)에 대비하기 위한 사업의 일환으로 제주도내 양식장의 배출수를 이용한 소수력 발전소 건설 설계를 수행하였다. 현재 남해안과 제주도 일원에서 운영중인 약 700 ~ 800여 양식장 방류수구의 경우 폐사한 어류, 무분별하게 버려지는 생활쓰레기, 토사등의 유입이나 배출이 원인이 되어 주변에 악취나 지역의 이미지를 저하시키는 등 좋지 못한 환경을 보이고 있다. 이러한 위치에 소수력 발전소를 건설하여 수로나 주변 환경을 정비함은 물론 외부에서 유입되는 쓰레기를 차단할 수 있다.

Fig.2.13에 보이는 것과 같이 해양 배출수를 적극 활용하기 위한 목적으로 조사된 제주도내 약 300여개의 양식장 중에서 제주 행원리 일원은 기 조성된 풍력단지와 더불어 국내 최초의 스마트 그리드 실증단지와 인접하고 있어 해양소수력 발전의 적지로 선정되었다. 그림에서 보이는 위성사진과 현장 사진을 통하여 양식장에서 사용되고 연안으로 배출되는 발전소 건설 지점에 대한 조건을 확인할 수 있었으며, 발전소 건설에 대한 외부적인 요소들에 대한 검토를 수행할 수 있는 자료로 활용하였다.

기초 설계를 위한 설치 현장의 사용가능 유효낙차를 조사한 결과 2m로 추정되었으며, 유량 조사결과  $8.1m^3/sec$ 에 이르고 있으나 수차의 운전특성 및 발전소의 크기, 주변여건 등을 고려하여  $5.5m^3/sec$ 를 발전용수로 이용하고 나머지는 방류시키는 것으로 결정하였다. 또한 발전을 위하여 사용할 발전수량은 수차 사이즈 축소와 효율 및 회전수 증대를 위하여 2대를 병렬 연결하여 사용하는 것으로 설계를 수행하였다. 이와 같이 결정된 유효낙차와 유량조건을 기준으로 행원리 해양소수력 발전소의 수차발전 시스템에 있어서 구성요소들의 상세 설계를 다음과 같이 수행하였다.

#### 1) 설치 지점의 유량조건 및 유효낙차 산정

일반적으로 해수를 이용한 양식장의 운영에 있어서 사용수량의 변화가 거의 없으므로 발전에 사용 할 사용유량은  $5.5m^3/sec$ , 상류수위는 2.271m로 고정하고 평균조위의 변화량을 월별로 평균하여 평균낙차를 산정하였다.



(a) Satellite image



(b) Check point

Fig.2.13 View of Hangwonri before installation

Table 2.1에서 보이는 바와 같이 수차발전소의 설치 지점인 제주시 행원리 일원의 해수면 변화량을 고려해 볼때 평균낙차는 1.7~2m 사이에서 주로 형성됨을 알 수 있다. 일반적으로 프로펠러 수차의 최소 운용 허용범위를 2m 이상으로 고려하므로 본 수차의 설계에도 낙차2m를 정격으로 산정하여 설계를 수행하였다. 물론 수차발전기의 24시간 운전을 전제로 할 때 조수간만의 차에 의한 압력변동이 나타나더라도 유효낙차가 존재하는 범위에서는 발전이 가능하다는 조건을 전제로 설계가 수행되었다.

Table 2.1 Calculated output following the sea level in 2007

| 월   | 평균조위<br>(EL.m) | 상류수위<br>(EL.m) | 평균낙차<br>(m) | 사용수량<br>(m³/sec) | 수차효율<br>(%) | 발전기<br>효율(%) | 발전량<br>(kWh) |
|-----|----------------|----------------|-------------|------------------|-------------|--------------|--------------|
| 1월  | -0.145         | 2.271          | 1.995       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 39.90        |
| 2월  | -0.178         | 2.271          | 2.028       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 40.56        |
| 3월  | -0.060         | 2.271          | 1.811       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 36.22        |
| 4월  | -0.088         | 2.271          | 1.867       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 37.34        |
| 5월  | -0.006         | 2.271          | 1.722       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 34.44        |
| 6월  | 0.046          | 2.271          | 1.633       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 32.66        |
| 7월  | 0.115          | 2.271          | 1.511       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 30.22        |
| 8월  | 0.178          | 2.271          | 1.346       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 26.92        |
| 9월  | 0.136          | 2.271          | 1.459       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 29.18        |
| 10월 | 0.007          | 2.271          | 1.695       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 33.90        |
| 11월 | 0.017          | 2.271          | 1.674       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 33.48        |
| 12월 | -0.043         | 2.271          | 1.838       | 2.743            | 0.80        | 0.93         | 36.76        |
| 평균  |                |                |             |                  |             |              | 34.30        |

## 2) 유량과 낙차 조건에 적합한 수차의 형식 및 대응범위 결정

앞서 결정한 평균낙차는 1.7m 이상으로 나타나지만 발전량은 만조에서 간조까지의 낙차 변화량에 좌우됨을 인지하여 수차의 대응 범위를 결정해야 하는 전제 조건이 따른다. 따라서 소수력용 튜블러 수차 날개의 최대각 및 최소각에서의 발전량을 고려하여 수차 정지 기간을 최소화 할 수 있도록 수차 설치 위치를 결정하였다.



### 3) 날개 구동부 조건 검토

날개 매수는 10m 이하 조건이므로 4매로 결정하였으며 상부 수위의 고정으로 압력의 변화량도 크지 않으므로 가이드 베인 시스템은 채용하지 않았다. 특히 본 수차의 경우 유입측 보다는 출구측의 수위 변동이 심하게 나타나는 조건이므로 가이드 베인의 기능은 더욱 미미할 것으로 판단되었다. 수차 날개의 개도는 8도에서 28도까지 조절이 가능하도록 설계에 적용하였으나, 발전량이 많지 않은 관계로 실제 개도에 따른 유량이나 압력의 변화는 크지 않을 것으로 추정되었다.

### 4) 구성요소 결정

이미 수행한 절차와 동일한 방법으로 결정된 수차의 사양을 Fig.2.14에 보이는 것과 같은 배치를 통하여 2대를 병렬로 연결하여 사용하는 것으로 발전소 설계를 수행하였다. 발전소의 구성은 수차 전단과 후단에 각각 긴급차단밸브와 차단용 버터플라이 밸브를 적용하였으며, 긴급차단밸브와 수차와의 사이에는 유지보수를 위한 신축관을 삽입하였다. 수차에서 토출되는 방류수의 원활한 흐름을 위해서 흡출관의 확대각도를 6도로 설정하여 설계하였다.

이와 같이 검토를 통하여 결정된 설계인자는 다음과 같다.

#### ① 수차의 정격 산정

$$Q = 2.75 \text{ m}^3/\text{s}, \quad H = 2\text{m} \text{ (1기당 적용유량)}$$

$$Q_{des} = Q \times 1.1 = 3.025 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### ② 날개 외경의 선정

$$n_{11} = 145 \text{ rpm}, \quad Q_{11} = 2050 \text{ l/s}$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{3025}{2050 \times \sqrt{2}}} = 1.021 \text{ m}$$

$$D_1 = 1.02 \text{ m}$$

$$D_{1P} = 1.0 \text{ m}$$

③ 날개 회전수의 선정

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 145 \times \frac{\sqrt{2}}{0.982} \simeq 209rpm$$

$$n_P = 200rpm$$

$$n_d = n \times 2.3 = 460rpm$$

④ 예상출력

수차효율  $\eta_t = 80\%$ ,

$$P = 9.8 \times 2.75 \times 2.0 \times 0.80 = 43kW \text{ (수차 1기당)}$$

- 증속기 - 45kW급,

$$\eta_i = 95\%, N_{input} = 200rpm, N_{output} = 400rpm, P = 41kW$$

- 발전기 - 18극 유도발전기

$$\eta_g = 88\%, n_g = 400rpm$$

$$P_g = 37kW$$

- 종합 발전량

$$\eta = \eta_t \times \eta_i \times \eta_g = 0.8 \times 0.95 \times 0.88 = 67\%$$

$$\begin{aligned} P &= (9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_i \times \eta_g) \times 2 \\ &= (9.8 \times 2.75 \times 2.0 \times 0.8 \times 0.95 \times 0.88) \times 2 \simeq 72kW \end{aligned}$$



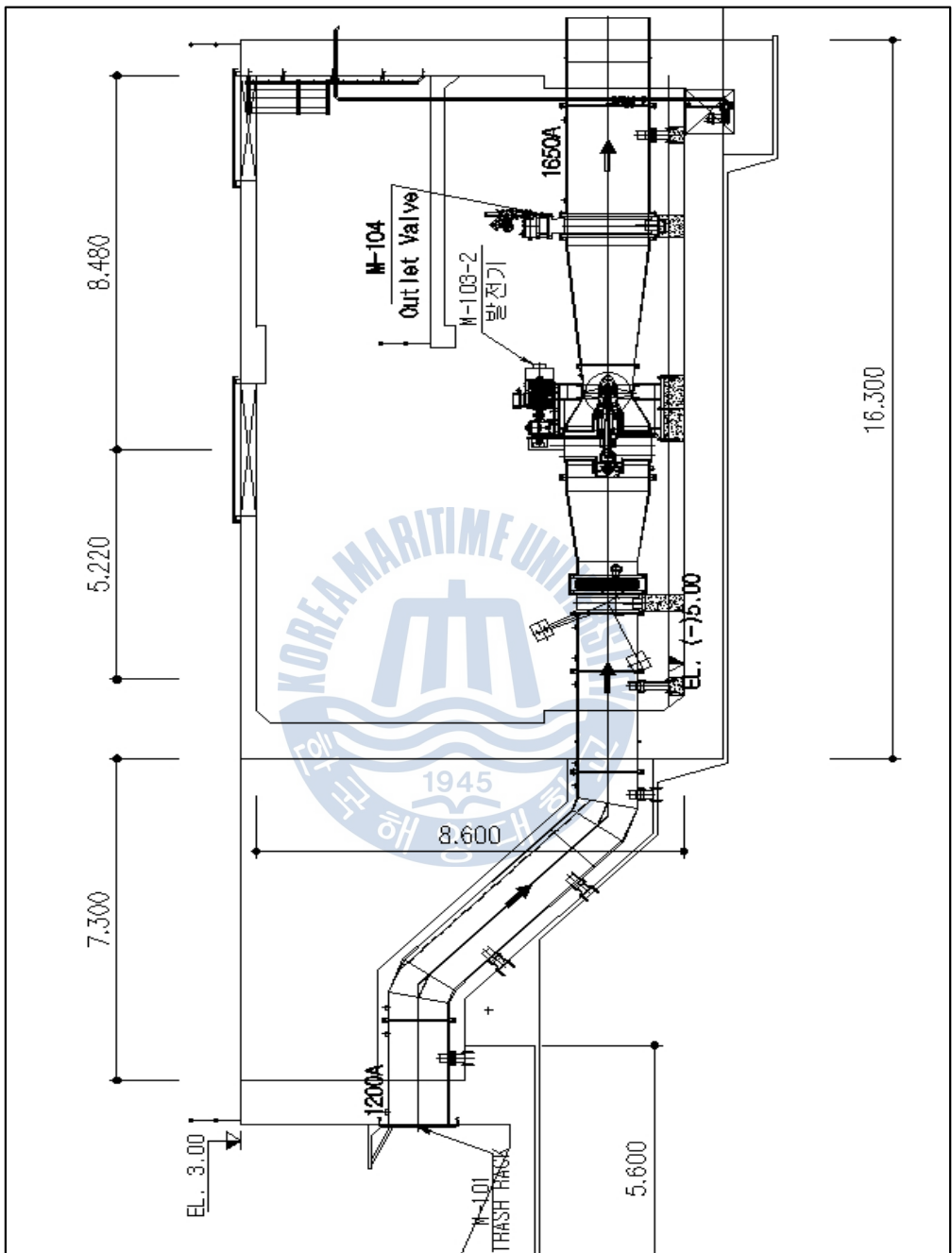


Fig.2.14 Sectional view of the low head power plant

### 2.3.2 중낙차 조건 ( $5m < H < 15m$ )

소수력용 마이크로 튜블러 수차의 초기 개발 단계에서 적용하고자 하였던 지점은 정수장 시설물의 감압변 기능을 대체하여 바이패스 관로를 구성하고 잉여에너지를 회수하는 것이 목적이었다. 따라서 대부분의 정수시설물을 관리하고 있는 한국수자원공사에서 운영하고 있는 정수장 시설물 내에 수차발전소를 건설하여 튜블러 수차의 운영조건에 대한 검토를 수행하였다. 사용수량과 유효수두, 정수장 운영조건등을 고려하여 선정한 동화정수장의 경우 동화댐에서 정수장내 착수정 전단에 이르는 구간에는 약 20m 이상의 유효낙차를 보유하고 있으나 지금까지 에너지를 회수하지 않고 흘려보내고 있다. 이 구간내에 설치되어 있는 바이패스 관로를 이용할 경우 최소의 공사만으로도 마이크로 튜블러 수차의 설치가 가능하였다. 댐에서 착수정 전단에 이르는 관로의 경우 계절별 용수의 공급량, 댐의 저수량에 편차가 심하게 나타나므로 평균유량이나 평균낙차의 산정에 주의를 필요로 한다. 정수장에 설치되어 운영되고 있는 유량계와 표고차를 이용하여 설계인자를 도출한 결과 착수정 전단에서 사용가능한 유량은  $0.3\text{m}^3/\text{sec}$ 에 이르고 있으며 착수정 전단과 댐의 수면과의 표고차를 측정한 결과 착수정 전단에 적용되는 유효낙차는 약 25m에 이르는 것으로 정수장 운영팀의 보고 자료에 나타나 있다. 하지만 현장 설치 여건을 고려하여 유효낙차의 범위를 10m 내외로 결정하고 튜블러 수차의 원활한 운용 및 발전설비의 보호를 위하여 수차 2대를 직렬 연결하여 사용하는 것을 병행하여 설계를 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단하였으며, 2.1절에서 기술한 내용과 같이 정수장 전단의 발전시설물 설치를 위한 설계 조건 검토를 다음과 같은 절차에 따라서 수행하였다.

- 설치 지점의 조건 선정을 위한 유량조건 및 유효낙차 산정
- 유량과 낙차 조건에 적합한 수차의 형식 및 대응범위 결정
- 날개 구동부 조건 검토
- 구성요소 결정

동화 소수력 발전소는 동화댐에서 동화정수장까지 유입되는 수도관에 발전기를 설치하여 잉여 에너지를 재활용 하도록 계획하였으며, 가장 중요한 건설 요소는 발전기설비로 인하여 동화정수장의 시설운영에 영향을 주어서는 안 된다

는 점이다. 그러므로 동화정수장의 유입유량 제어를 위해 버터플라이 밸브 2개 및 콘밸브 1개를 조절하여 유량제어 및 압력제어를 수행하면서 동화정수장이 정상 운영이 될 수 있도록 계획해야 한다. 이러한 정수장의 운영조건을 준수하여 기 설치된 바이패스 밸브의 분기관을 이용한 수차배치 계획을 Fig.2.15와 같이 수립하였다. 그리고 위에서 언급한 절차에 대해서 상세하게 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) 설치 지점의 조건 선정을 위한 유량조건 및 유효낙차 산정

소수력용 튜블러 수차의 운전조건은 수차의 성능을 확인위한 실험조건과 생산된 전기를 판매하기 위한 상업발전조건으로 나누어 유량을 선정하였다. 유량의 조절은 착수정 전단에 위치한 콘밸브를 조절하여 가능하다. 유량의 선정을 위한 정수장 운전데이터를 분석한 결과 Fig.2.16 및 Fig.2.17과 같이 나타났으며 계절적인 요인으로 인한 저수댐의 수위차, 사용수량의 편중등으로 인한 유량과 낙차의 편차가 나타남을 알 수 있었다. 따라서 실험조건은  $0.42\text{m}^3/\text{sec}$  유량에 29.42m 유효낙차로 결정하였으며, 상업발전조건으로  $0.3\text{m}^3/\text{sec}$  유량에 24.56m 유효낙차로 결정하였다.

#### 2) 유량과 낙차 조건에 적합한 수차의 형식 및 대응범위 결정

본 정수장 시설물의 경우 착수정 전단의 사고예방을 위하여 이미 바이패스 관로를 확보하고 있다. 따라서 분기관을 새로 형성하거나 바이패스 관로상에 직접 설치하여 발전을 개시할 수 있는 튜블러 수차의 적용은 매우 효율적인 형식이 될 수 있다. 더군다나 인구의 증가나 사용수량의 감소등으로 유량의 급격한 변화가 있을 경우에는 수차의 이전설치나 추가설치가 용이한 장점이 있다. 프란시스 터빈이나 임축 카플란 터빈의 경우에는 튜블러 수차와 비교하여 비교적 많은 건설공사가 수반되어야 하는 단점과 명확하게 구분되는 사항이다. 이미 조사된 측정데이터를 기준으로 산정한 유량과 유효낙차에 대하여 설치 조건에 가장 합당한 수차를 선정하여야 하며, 더하여 수차의 최소 출력점과 최대 출력점을 결정하여 설계에 반영하여야 한다. 정수장의 경우이미 언급한 바와 같이 소수력 발전용 튜블러 수차는 밸브 수차의 선정조건과 거의 일치하므로 동화정수장의 정격 운전조건에 튜블러 수차를 설치하는 것으로 한다. 유량 변동량  $0.2\text{m}^3/\text{sec} \sim 0.45\text{m}^3/\text{sec}$  범위에서는 수차발전기의 안정적인 운전이 가능하도록 하고 유량범위 내에서 낙차는

10m~15m 범위에서 형성될 경우 수차의 정상적인 운전이 가능하다.

### 3) 날개 구동부 조건 검토

이미 언급한바와 같이 날개 매수는 10m를 기준으로 4매와 5매를 결정하는 것이 합당하다. 하지만 본 설치 지점의 조건은 설치 위치에 따른 유효낙차의 편차가 심할 것으로 추정되므로 4매와 5매를 모두 사용할 수 있도록 구성하였다. 또한 시스템의 간소화를 위하여 가이드베인은 구성요소에서 삭제하였으며 날개의 개도는 8도에서 26도까지 조절이 가능하도록 설계에 적용하였다.

### 4) 구성요소 결정

외측 케이싱의 크기는 통수량에 따른 유속 및 기존 관로의 크기를 고려하여 결정하였으며, 동력전달은 벨트, 발전기는 동기발전기로 선정하여 설계를 위한 조건 검토를 완료하였다. 이와 같은 절차를 통해서 결정된 수차 발전기의 사양을 다음과 같이 설계 반영토록 하였다. 설계요소를 반영한 최종 선정도는 Fig.2.18에 보이는 바와 같이 2대를 직렬로 연결할 수 있는 조건과 함께 적용하였으며, 필요시 수차1기의 제거가 가능하도록 하였다. 본 시스템에서는 입구측과 토출측이 모두 수차의 날개보다 낮은곳에 위치하고 있으므로 유지보수용 밸브는 별도로 필요하지 않으며, 기존의 바이패스 밸브를 이용한 제어가 가능한 장점이 있다.

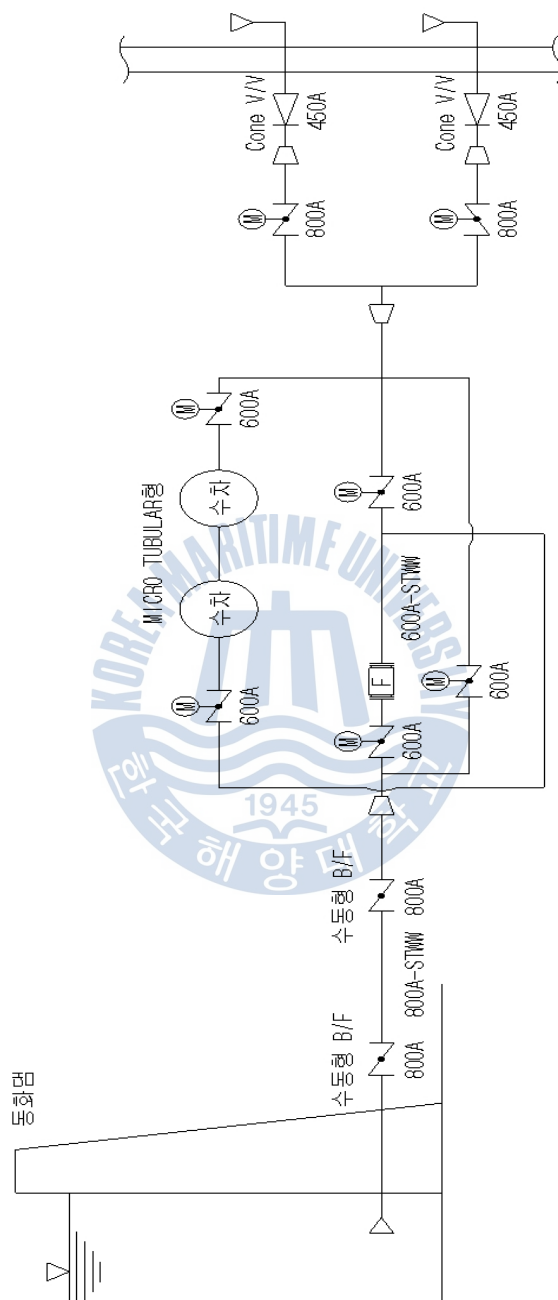
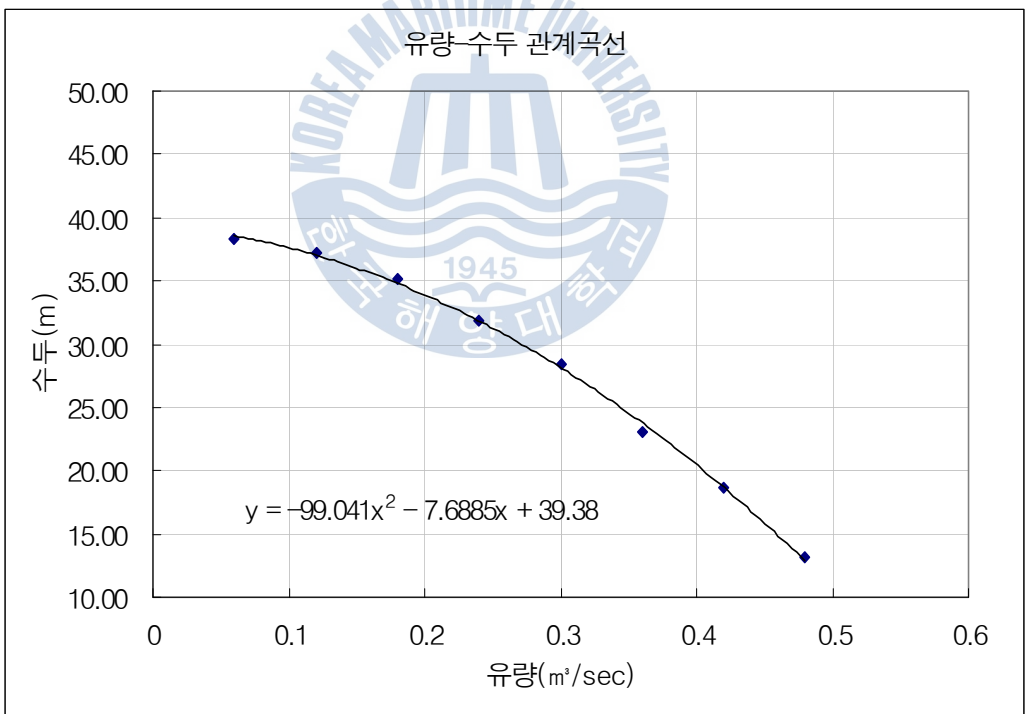


Fig.2.15 Location of turbine and status of valves

| 구 분                     | CONE밸브 개도율에 따른 유량 대 압력 데이터 |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 10%                        | 20%   | 30%   | 40%   | 50%   | 60%   | 70%   | 80%   |
| 유량(m <sup>3</sup> /h)   | 216                        | 433   | 650   | 866   | 1083  | 1300  | 1516  | 1733  |
| 유량(m <sup>3</sup> /s)   | 0.06                       | 0.12  | 0.18  | 0.24  | 0.3   | 0.36  | 0.42  | 0.48  |
| 관압(kg/cm <sup>2</sup> ) | 3.83                       | 3.72  | 3.51  | 3.18  | 2.84  | 2.31  | 1.87  | 1.31  |
| 수두(m)                   | 38.30                      | 37.20 | 35.10 | 31.80 | 28.40 | 23.10 | 18.70 | 13.10 |

(a) Measuring data



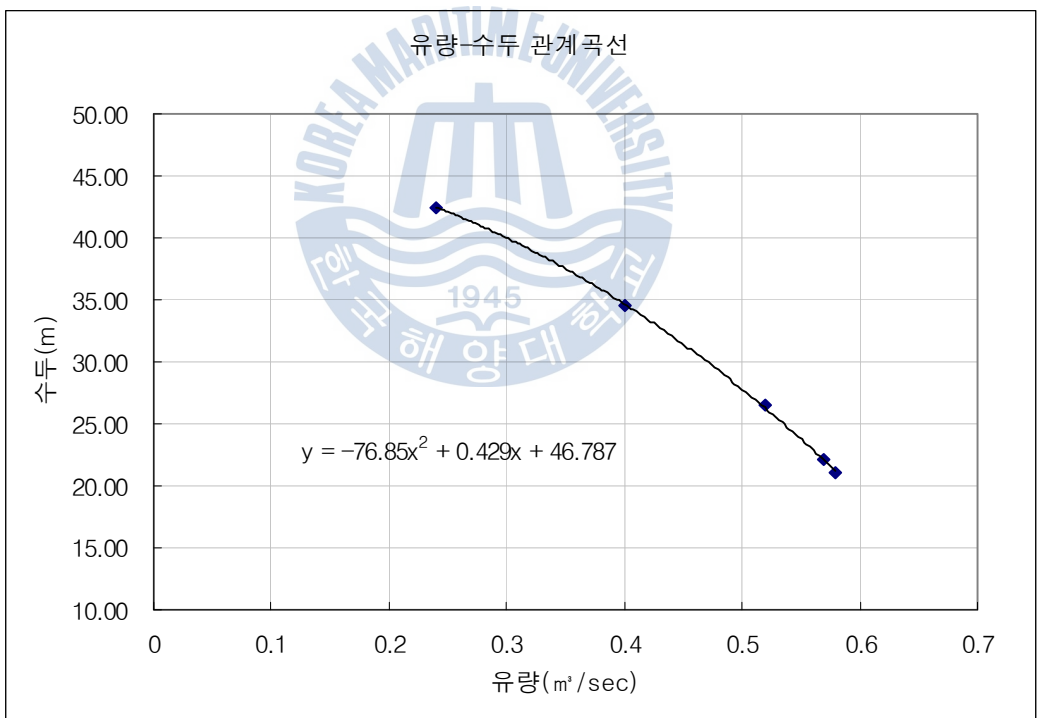
(b) Curve by data

Fig.2.16 Characteristic curve by flow rate and efficiency head(2007.03)



| 구 분                     | CONE밸브 개도율에 따른 유량 대 압력 데이터 |       |       |       |       |
|-------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 10%                        | 20%   | 30%   | 40%   | 50%   |
| 유량(m <sup>3</sup> /h)   | 850                        | 1,452 | 1,854 | 2,052 | 2,100 |
| 유량(m <sup>3</sup> /s)   | 0.24                       | 0.40  | 0.52  | 0.57  | 0.58  |
| 관압(kg/cm <sup>2</sup> ) | 4.25                       | 3.45  | 2.65  | 2.21  | 2.10  |
| 수두(m)                   | 42.50                      | 34.50 | 26.50 | 22.10 | 21.00 |

(a) Measuring data



(b) Curve by data

Fig.2.17 Characteristic curve by flow rate and efficiency head(2007.10)

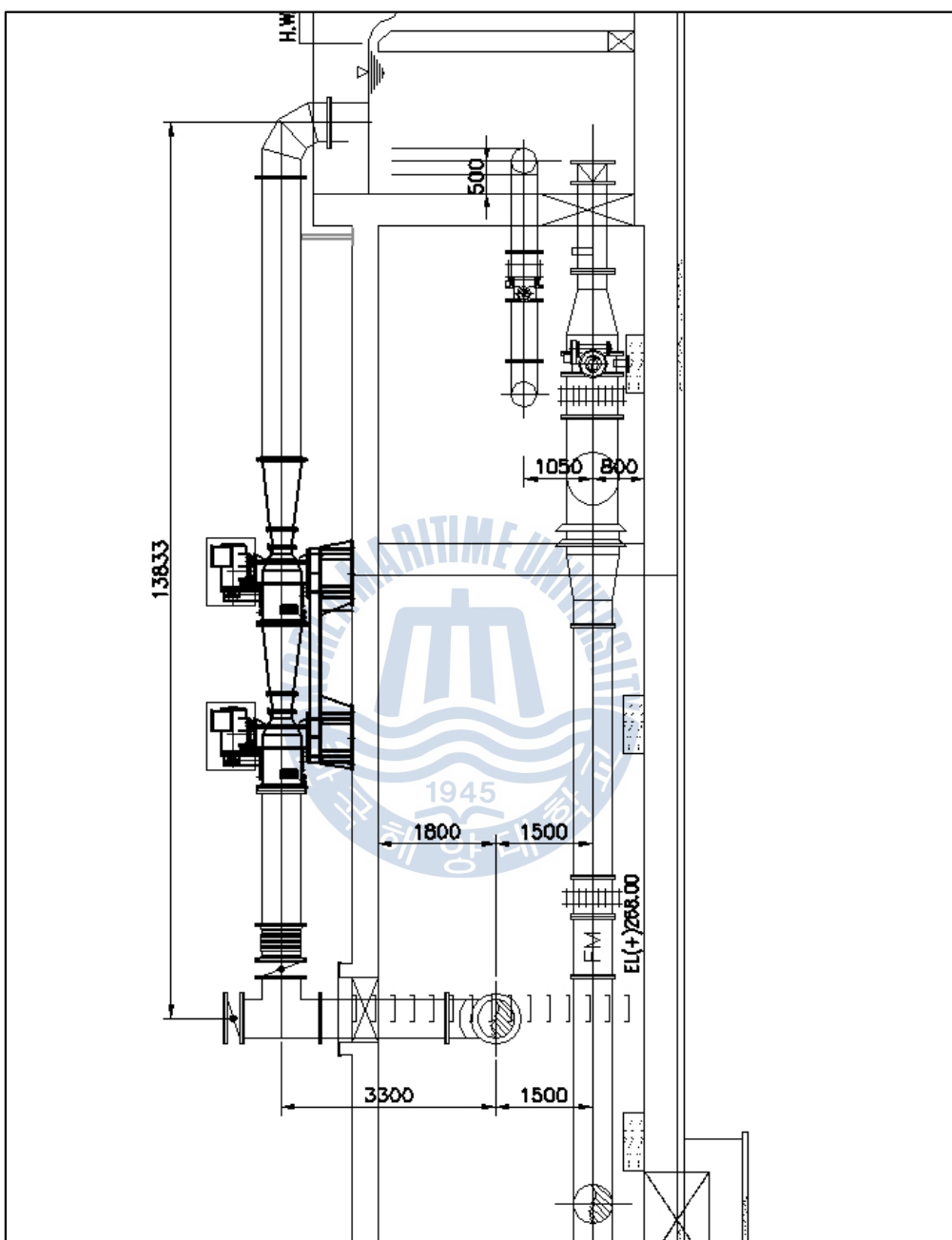


Fig.2.18 Sectional view of middle head power plant (serial arrangement)

이와 같이 정수장 시설물의 잉여에너지 회수를 위한 소수력발전소 건설 조건 검토를 통하여 결정된 설계인자는 다음과 같다.

① 정격 산정

$$Q = 0.3m^3/s, \quad H = 12.28m \quad (1기당 적용낙차)$$

$$Q_{des} = Q \times 1.1 = 0.315m^3/s$$

② 날개 외경의 선정

$$n_{11} = 150rpm, \quad Q_{11} = 1190l/s$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{315}{1190 \times \sqrt{12.28}}} = 0.2748m$$

$$D_1 = 0.280m$$

③ 날개 회전수의 선정

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 150 \times \frac{\sqrt{12.28}}{0.27496} \approx 1911rpm$$

$$n_P = 1900rpm$$

$$n_d = n \times 2.3 = 4370rpm$$

④ 예상출력

$$\text{수차효율 } \eta_t = 80\%,$$

$$P = 9.8 \times 0.3 \times 12.28 \times 0.80 = 28.7kW \quad (\text{수차 1기당})$$

- 발전기 - 4극 유도발전기

$$\eta_g = 90\%, \quad n_g = 1800rpm$$

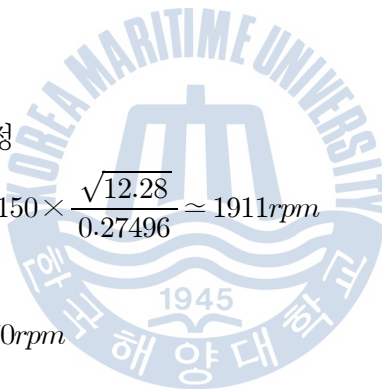
$$P_g = 30kW$$

- 종합 발전량

$$\eta = \eta_t \times \eta_i \times \eta_g = 0.8 \times 0.97 \times 0.9 = 70\%$$

$$P = (9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_i \times \eta_g) \times 2$$

$$= (9.8 \times 0.3 \times 12.28 \times 0.8 \times 0.97 \times 0.9) \times 2 \approx 50.4kW$$



### 2.3.3 고낙차 조건 ( $H > 15m$ )

소수력발전 최대 사용수량은 kW당 건설비 및 발전원가의 허용범위 내에서 발전 전력량을 최대로 할 수 있는 규모로 발전시설용량을 산정하는 것이 유리하며, 장래의 유량변동을 고려하여야 한다. 일반적으로 수로식 발전소의 최대 사용수량은 보통 하천 갈수량의 2~3배로 유황곡선에서 평수량(약 50% 지속유량) 정도이고, 댐식 발전소에서는 풍수량(약 26% 지속유량) 정도로 적용하는데, 폐수종말처리장의 경우는 연간 유량변동이 적으므로 풍수량 이상인 계획 시설용량을 적용하는 것이 적절할 것으로 보고되어 있다.

경기도 파주시 일원에서 운영되고 있는 파주 LCD 산업단지의 폐수처리장을 통해서 방류되고 있는 방류수의 낙차와 유량을 이용하여 소수력 발전을 수행하고자 설계를 수행하였다. 파주 LCD 산업단지의 폐수발생량은 1일 14만톤(2011년 기준)이며, 향후 230만톤/일의 폐수가 발생될 것으로 예상하고 발전소의 설계를 수행하였다. 폐수처리장의 경우 정수장과는 달리 방류량의 변동이 있으나 계절별, 기후별 변동량이 많지 않기 때문에 안정적인 발전이 가능한 장점을 보이고 있다. 산업의 동향에 따라 LCD 공장의 증설과 함께 폐수의 유출량이 대량으로 늘어날 것을 고려하여 향후 물량을 고려한 수차발전소의 건설을 검토하였다.

#### 1) 설치 지점의 조건 선정을 위한 유량조건 및 유효낙차 산정

LCD폐수종말처리장에 대해 2009년 1월 1일부터 2009년 8월 31일까지 1단계, 2009년 9월 1일부터 2010년 4월 30일까지 2단계 폐수유입 및 방류 실적량을 조사하였으며, 이를 토대로 유황 분석한 결과 1단계 폐수방류량은 일평균 39,669m<sup>3</sup>/d (최소 23,630~최대 49,550m<sup>3</sup>/d)로 Fig.2.19에서 보는 바와 같이 균등하게 방류되었으며 2009년 9월 1일부터 2단계 시설에 대한 시운전이 시작되어 Fig.2.20과 같이 유입량이 점차 증가하여 2010년 4월 폐수방류량은 Fig.2.21에 보이는 것과 같이 평균 77,204m<sup>3</sup>/d (최소 72,290~최대 84,610m<sup>3</sup>/d)로 나타났다.

폐수종말처리장내 방류 맨홀의 EL은 40.155m이며 방류수구측의 수위는 20.050m로 측정되었다. 저낙차 지점 설계와 같이 방류측이 일반 하천임을 고려하여 계획홍수위는 17.05m이나 제방고 등을 고려하여 20.5m로 계획하였다. 또한 정수장 시설물과는 달리 관로가 구성되어 있지 않으므로 수차

의 설치지점 전단의 압력측정이 불가능하므로 계획된 수압관로의 배치를 근거로 유효수두 계산을 다음과 같이 수행하였다.

◦ 일최대 하수계획량(Q) = 140,000m<sup>3</sup>/일(1.620m<sup>3</sup>/sec)

◦ 유속계수(C) = 130(SP)

◦ 유속(V) = 1.620 or 0.810m/sec

$$= (\pi \times D^2) / (4 \times Q)$$

◦ 직관손실(h) = 0.060 or 0.598m

$$= 10.666 \times C^{-1.85} \times D^{-4.87} \times Q^{1.85} \times L$$

◦ 유입손실(h<sub>1</sub>) = 0.052m

$$= f_i \times L \times V^2 / (D \times 2g)$$

◦ 곡관손실(h<sub>b</sub>) = 0.075 or 0.106m

$$= f_b \times L \times V^2 / (D \times 2g)$$

◦ 수두손실

| 내역    |        |         | 유량<br>(m³/sec) | 단면적<br>(m²) | 유속<br>(m/sec) | 계수<br>(f) | 손실수두  |
|-------|--------|---------|----------------|-------------|---------------|-----------|-------|
| 마찰손실  | D800   |         | 0.810          | 0.503       | 1.611         | 0.031     | 0.060 |
|       | D1,200 |         | 1.620          | 1.131       | 1.432         | 0.039     | 0.598 |
| 유입손실  | D1,200 |         | 1.620          | 1.131       | 1.432         | 0.500     | 0.052 |
| 곡관손실  | D800   | 11+ 1/4 | 0.810          | 0.503       | 1.611         | 0.030     | -     |
|       |        | 22+ 1/2 | 0.810          | 0.503       | 1.611         | 0.045     | -     |
|       |        | 45      | 0.810          | 0.503       | 1.611         | 0.284     | 0.075 |
|       | D1,200 | 11+ 1/4 | 1.620          | 1.131       | 1.432         | 0.030     | 0.003 |
|       |        | 22+ 1/2 | 1.620          | 1.131       | 1.432         | 0.045     | 0.014 |
|       |        | 45      | 1.620          | 1.131       | 1.432         | 0.284     | 0.089 |
| 손실수두  |        |         |                |             |               | 0.892     |       |
| 여유수두  |        |         |                |             |               | 0.089     |       |
| 총손실수두 |        |         |                |             |               | 0.981     |       |

◦ 총 손실수두 = 손실수두 + 여유수두(손실수두×10%)

$$= 0.892 + 0.089 = 0.981m$$

$$\circ \text{ 유효수두} = \text{상류수위} - \text{총 손실수두} - \text{하류수위}$$

$$= 39.000 - 0.981 - 20.050 = 17.969\text{m}$$

따라서 발전을 위한 유효수두는 18.950m로 계산되었으나 방류에 의한 각종 관로손실에 따른 수두손실 0.981m를 제외하면 실질적인 유효수두는 17.969m 로 산정이 가능하다. 또한 향후 사용수량의 증가를 고려하여 향후 추가될 부분에 대한 계산을 추가로 수행하였다.

$$\circ \text{ 일최대 하수계획량}(Q) = 230,000\text{m}^3/\text{일}(2.662\text{m}^3/\text{sec})$$

$$\circ \text{ 유속계수}(C) = 130(\text{SP})$$

$$\circ \text{ 유속}(V) = 2.662 \text{ or } 0.887\text{m/sec}$$

$$(\pi \times D^2) / (4 \times Q)$$

◦ 수두손실

| 내역    |        |         | 유량<br>(m³/sec) | 단면적<br>(m²) | 유속<br>(m/sec) | 계수<br>(f) | 손실수두  |
|-------|--------|---------|----------------|-------------|---------------|-----------|-------|
| 마찰손실  | D800   |         | 0.887          | 0.503       | 1.763         | 0.031     | 0.072 |
|       | D1,200 |         | 2.662          | 1.131       | 2.354         | 0.039     | 1.615 |
| 유입손실  | D1,200 |         | 2.662          | 1.131       | 2.354         | 0.500     | 0.141 |
| 곡관손실  | D800   | 11+ 1/4 | 0.887          | 0.503       | 1.763         | 0.030     |       |
|       |        | 22+ 1/2 | 0.887          | 0.503       | 1.763         | 0.045     |       |
|       |        | 45      | 0.887          | 0.503       | 1.763         | 0.284     | 0.090 |
|       | D1,200 | 11+ 1/4 | 2.662          | 1.131       | 2.354         | 0.030     | 0.008 |
|       |        | 22+ 1/2 | 2.662          | 1.131       | 2.354         | 0.045     | 0.038 |
|       |        | 45      | 2.662          | 1.131       | 2.354         | 0.284     | 0.241 |
| 손실수두  |        |         |                |             |               |           | 2.205 |
| 여유수두  |        |         |                |             |               |           | 0.221 |
| 총손실수두 |        |         |                |             |               |           | 2.426 |

$$\circ \text{ 직관손실}(h) = 0.072 \text{ or } 1.615\text{m}$$

$$= 10.666 \times C^{-1.85} \times D^{-4.87} \times Q^{1.85} \times L$$

$$\circ \text{ 유입손실}(h_1) = 0.141\text{m}$$

$$= f_i \times L \times V^2 / (D \times 2g)$$

$$\circ \text{ 곡관손실}(h_b) = 0.090 \text{ or } 0.287\text{m} = f_b \times L \times V^2 / (D \times 2g)$$



◦ 총 손실수두 = 손실수두 + 여유수두(손실수두×10%)

$$= 2.205 + 0.221 = 2.426m$$

◦ 유효수두 = 상류수위 - 총 손실수두 - 하류수위

$$= 39.000 - 2.426 - 20.050 = 16.524m$$

이므로 발전을 위한 유효수두는 18.950m이나 방류에 의한 각종 관로손실에 따른 수두손실 2.426m를 제외하면 실질적인 유효수두는 16.524m 이다. 이와 같은 과정을 통하여 검토한 결과 손실을 고려하여 발전에 사용될 유효수두는 16.5m 로 결정하였다.

## 2) 유량과 낙차 조건에 적합한 수차의 형식 및 대응범위 결정

사용수량  $0.88 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 유효낙차가 16.5m 이상을 최종 확인한 결과 수차발전소를 건설하기에 적합한 장소로 확인되었다. 특히 프란시스수차나 크로스플로어 수차, 입축 카플란 수차까지 설치를 고려할 수 있으나 향후의 운영여건을 고려하여 최종 설계 조건을 고려하였다. 한 번의 토목공사를 통하여 수차의 추가 설치가 용이하도록 구성하는 것이 합리적이므로 기본적인 관로구성을 초기에 구성하고 추후 수차의 설치가 가능한 튜블러 수차를 선정하였다. 운영지점에 관한 선정도표는 Fig.2.22에 보이고 있으며, 프란시스 수차와 튜블러 터빈을 적용할 경우 설치대수에 따른 조건을 Table 2.2와 같이 검토 비교하였다. 가장 효율이 좋을 것으로 보이는 프란시스터빈의 경우 유량대응 범위가 한정되는 단점으로 인하여 연간발전량에 있어서는 튜블러 터빈을 여러대 운영하는 경우에 비해서 가동율이 저하될 것으로 판단되었으므로 튜블러 수차의 적용은 적합한 것으로 판단하였다.

## 3) 날개 구동부 조건 검토

또한 정수장 시설물에 적용한 수차의 특성에서 나타난 개도별 통수량을 고려하여 고낙차용 수차의 날개 개도별 통과 수량을 Fig.2.23과 같이 예측하였다. 해당 폐수처리장의 경우 유효낙차가 15m 이상임을 고려할 때 벌브 터빈의 영역에서는 회전수가 높은 경우에 포함되며, 가이드 베인 시스템을 적용할 경우 조금 더 낮은 효과를 볼 수 있을 것으로 기대되지만 사업자의 경제적 측면을 고려할 때 날개의 개도 제어를 통한 유량제어만 수행해도 무방할 것으로 판단하였다.

#### 4) 구성요소 결정

이미 수행한 절차와 동일한 방법을 통하여 결정된 수차의 사양을 적용하여 Fig.2.24에 보이는 것과 같이 튜블러 터빈 3대를 병렬로 연결하여 폐수처리장에서 방류되는 모든 수량을 발전에 사용할 수 있도록 발전소 설계를 수행하였다. 언급한 바와 같이 본 발전소의 경우 향후 인근 산업단지의 확장으로 인하여 공장에서 사용하는 공업용수의 증가가 예상되므로 발전소 설계시 사전 반영하여 적용하였다.



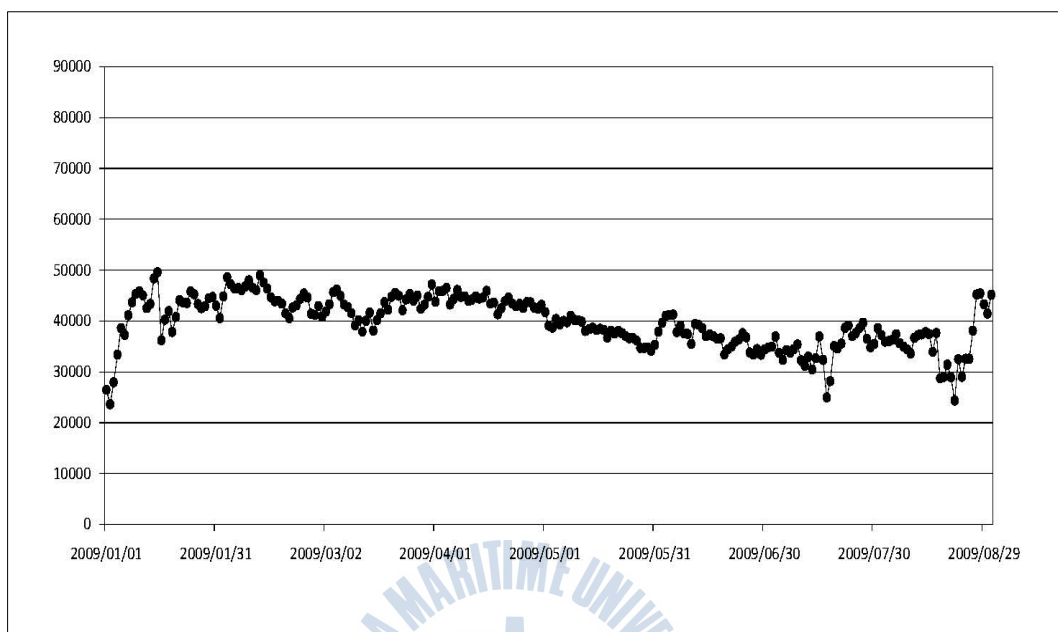


Fig.2.19 1st stage – discharge of wastewater

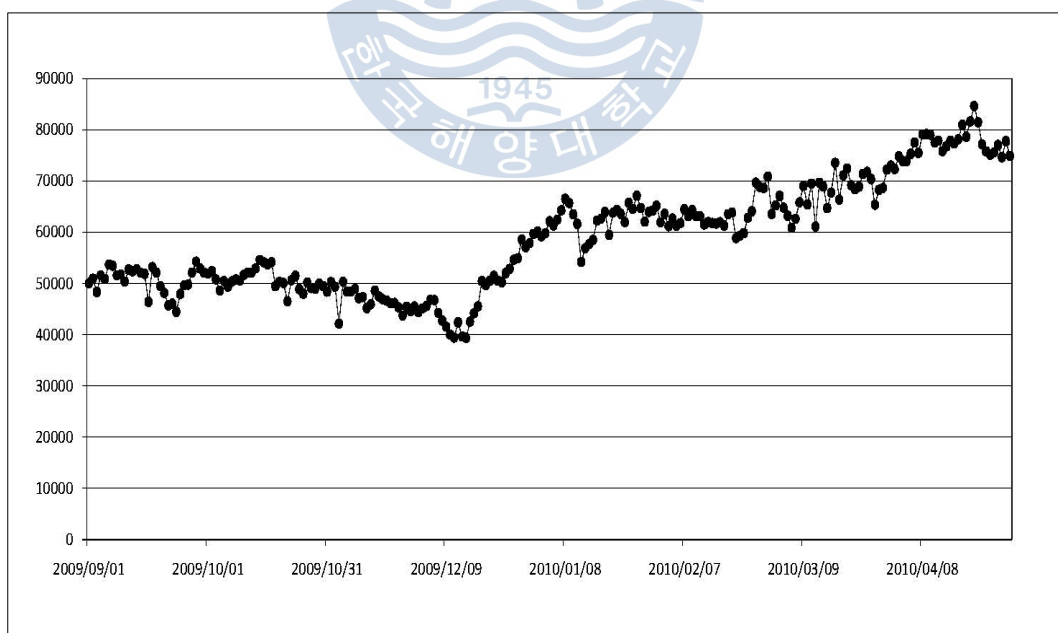


Fig.2.20 2nd stage – discharge of wastewater

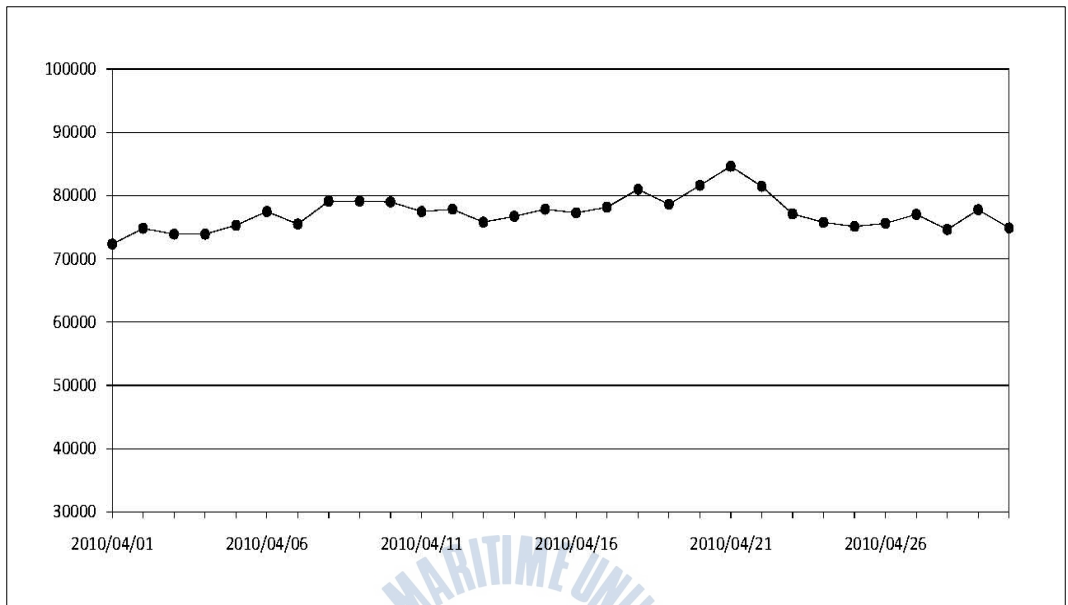


Fig.2.21 Daily average wastewater flow in April

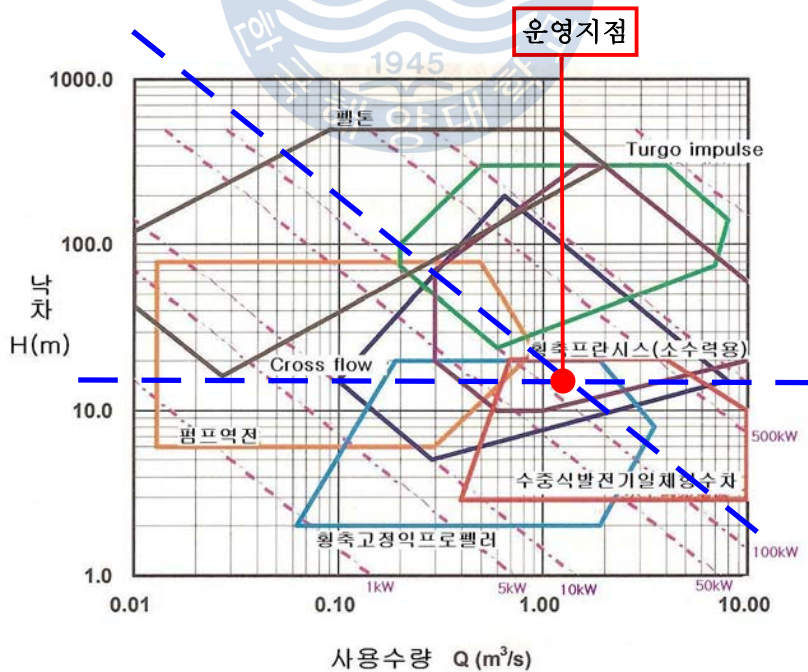


Fig.2.22 Installation range by effective head and flow rate

Table 2.2 Available turbine for installation

| 설치대수 | 대응가능 수차종류       | 대응가능 유량값                                  | 수차효율    | 비 고       |
|------|-----------------|---|---------|-----------|
| 1 기  | Francis turbine | 1.9m <sup>3</sup> /s~2.7m <sup>3</sup> /s | 50%~84% |           |
| 2 기  | Tubular turbine | 1.3m <sup>3</sup> /s~2.7m <sup>3</sup> /s | 78%~83% | 개도<br>조절형 |
| 3 기  | Tubular turbine | 0.8m <sup>3</sup> /s~2.7m <sup>3</sup> /s | 78%~83% | 개도<br>조절형 |

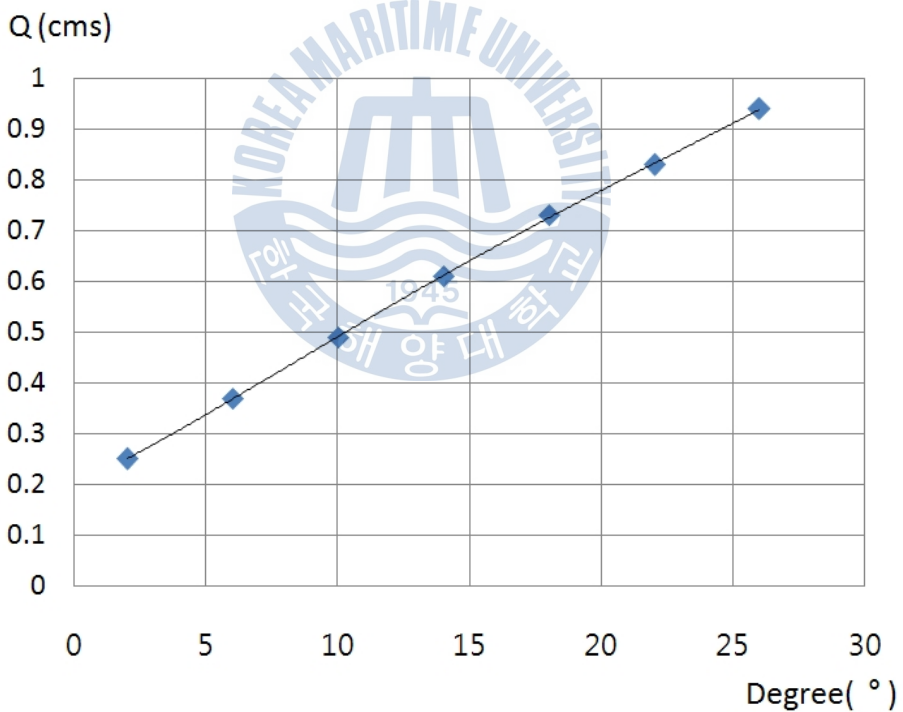


Fig.2.23 Performance characteristic curve by runner vane variation

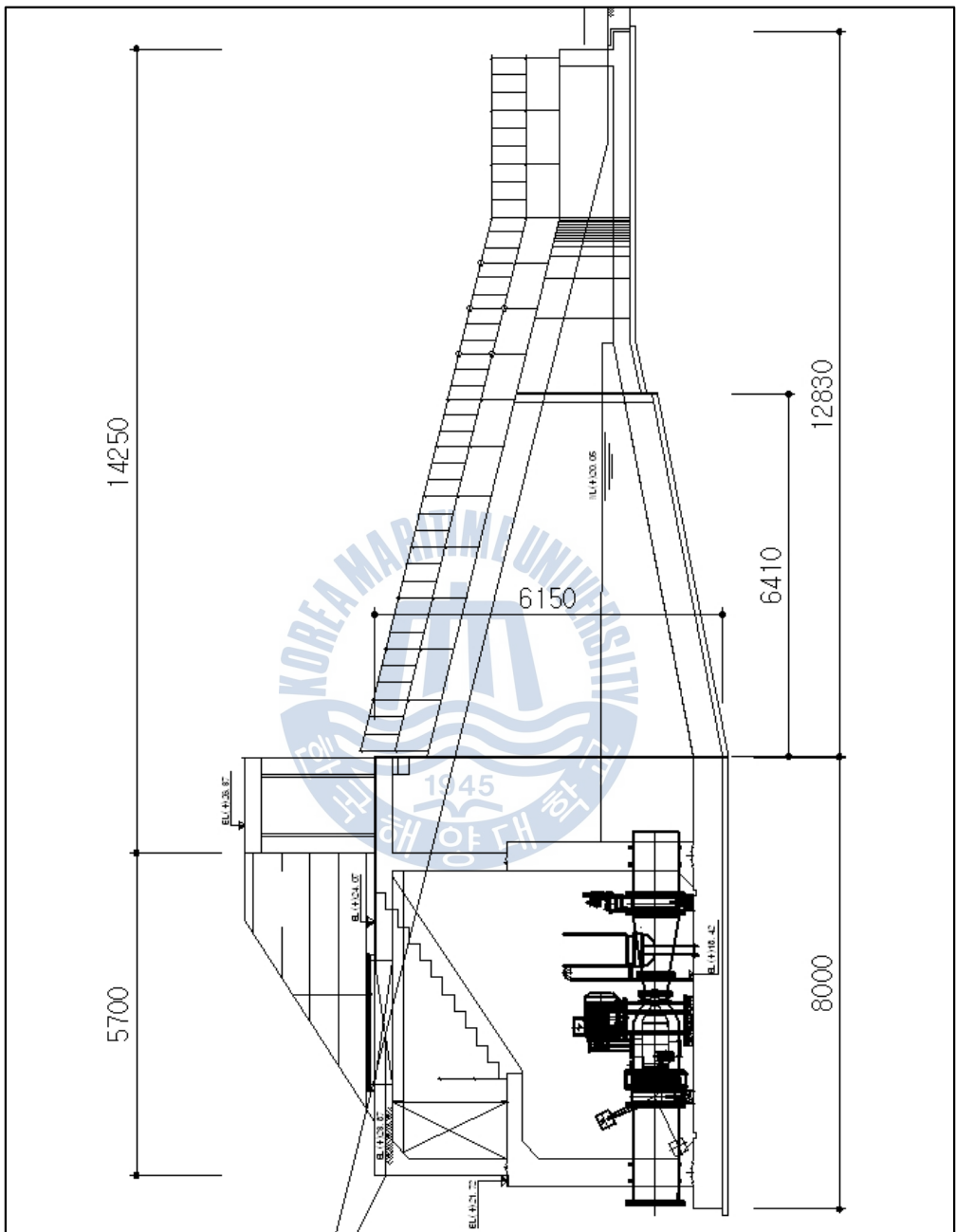


Fig.2.24 Sectional view of high head power plant



이와 같이 검토를 통하여 발전소 건설에 필요한 요소를 결정하였으며 결정된 설계인자는 다음과 같이 설계 절차로 적용되었다.

① 정격 산정

$$Q = 0.88 \text{ m}^3/\text{s}, \quad H = 16.5 \text{ m} \quad (1\text{기당 적용낙차})$$

$$Q_{des} = Q \times 1.1 = 0.968 \text{ m}^3/\text{s}$$

② 날개 외경의 선정 (개도각  $26^\circ$ 로 선정)

$$n_{11} = 140 \text{ rpm}, \quad Q_{11} = 1630 \text{ l/s}$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{968}{1630 \times \sqrt{16.5}}} = 0.382 \text{ m}$$

$$D_1 = 0.389 \text{ m}$$

③ 날개 회전수의 선정

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 140 \times \frac{\sqrt{16.5}}{0.383} \simeq 1484 \text{ rpm}$$

$$n_P = 1480 \text{ rpm}$$

$$n_d = n \times 2.3 = 3400 \text{ rpm}$$

④ 예상출력

- 수차 1기당 예상 출력

$$\text{수차효율 } \eta_t = 83\%,$$

$$P = 9.8 \times 0.88 \times 16.5 \times 0.83 = 118 \text{ kW}$$

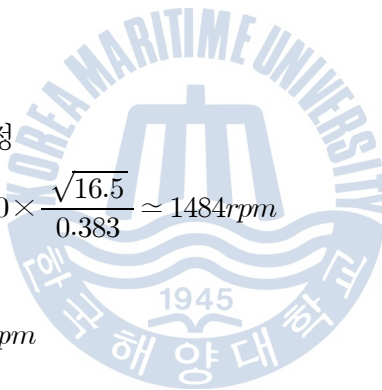
- 발전기 - 110kW급 6극 유도발전기

$$\eta_g = 93\%, \quad n_g = 1215 \text{ rpm}$$

- 종합 발전량

$$\eta = \eta_t \times \eta_g = 0.83 \times 0.93 = 77.2\%$$

$$P = (9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g) \times 3 = (9.8 \times 0.88 \times 16.5 \times 0.83 \times 0.93) \times 3 \simeq 330 \text{ kW}$$



### 2.3.4 공통 설계 조건

#### 1) 가이드 베인의 제거

통상 프로펠러 수차는 회전 날개를 고정형으로 적용하고 가이드 베인을 조절형으로 사용하며, 카플란 수차의 경우 날개의 각도를 조절가능형으로 적용하여 사용하는 것으로 알려져 있다. 하지만 최근의 수차 제작사들은 마이크로급 수차의 적용확대를 위하여 다양한 형식의 수차를 개발하여 적용하고 있다. 본 연구의 대상인 소수력발전용 튜블러 수차도 기존 수차에 적용되어 온 가이드 베인의 적용을 가능한 배제하였다. 실제 날개 가변형 튜블러 수차에 있어서 가변형 가이드 베인의 유무에 따른 정격 지점에서 수차 성능의 차이를 살펴보면 Fig.2.8에 보이는 바와 같이 설계점에서의 성능의 차이는 거의 없는 것을 보이고 있으므로 가이드 베인은 제외하고 설계를 수행한다.

#### 2) 날개 열림 개도 범위 제한

수차 날개의 열림 개도는 0도에서 90도까지 가능하나 수차의 성능 및 날개의 특성에 비추어 10도 이내 및 26도 이상의 개도를 보일 경우 그 성능이 급격히 저하되는 현상을 보인다. 이는 이미 수행한 선행 연구를 통하여 결정하였을 뿐 아니라 현장 시험에서도 범위를 벗어날 경우 출력의 급격한 감소나 진동의 발생, 유량의 유입 감소등의 현상을 보였다. 따라서 서보모터의 회전수 제어를 통한 수차의 제어시스템 구축을 위하여 날개의 개도 범위는 10도에서 26도를 날개 열림 한계값으로 결정한다. 또한 본 수차에 적용된 구조의 특성에 따라 열림 개도를 크게 설계 할 경우 Fig.2.5에 보이는 것과 같이 축의 이송량이 증가하게 되어 구조적으로 취약점을 띄게 되므로 날개의 열림 개도는 가능한 최대에서부터 최소까지 20도 이내로 제한하도록 한다.

## 제3장 수치해석

본 연구에 적용된 중낙차, 저낙차 및 고낙차 터빈은 모두 동일한 사양과 설계 방식으로 제작되었으며 유량과 낙차의 차이에 따른 러너 사이즈의 차이와 주변 구성품의 크기에 차이가 있다. 따라서 본 연구에 사용된 튜블러 수차의 대표 형상인 중낙차 조건의 터빈을 모델로 선정하여 수치해석을 수행하였다. 실험 결과는 정수장 시설물 내 직접 설치하여 운전을 수행한 조건을 그대로 적용하였으며, 실험 조건에 따라서 효율의 많은 효율의 편차가 보이는 현상을 수치해석의 조건으로 그대로 적용하였다.

### 3.1 수치해석 기법

본 연구에 사용된 수차는 낙차와 유량조건에 따라 각각 설계되어진 3 종류의 수차이나, 조건에 따른 크기의 차이를 제외하면 거의 동일한 형식으로 볼 수 있다. 러너의 개도는 설계에 따른 각각의 개도를 따르고 있으며, 가이드 베인은 없는 것으로 설정하여 CFD 분석을 수행하도록 고려하였다. Fig.2.23에 보이는 형상과 같이 발전기와 벨트는 제외하고 내부 스테이 베인과 연결관 및 러너로 구성하여 계산을 위한 수차의 형상을 결정하였다.

본 연구에서는 유체기계 해석에 우수한 성능을 보이는 상용 CFD코드인 CFX-11을 사용하였다. 일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLEC, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들 압력에 기초한 코드들은 일반적으로 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 Multi-physics문제 등에 적용될 수 있다.

유체기계의 정확한 해석을 위해서는 점성저층(viscous sublayer)영역을 안정적으로 처리 할 수 있는 최적화된 난류모델들이 필요하다. 현재 상용코드에서 오랫동안 적용되어온  $k-\epsilon$  모델과 벽 함수의 조합은 유체 기계에서 요구되는 높은 해의 정밀도를 만족시킬 수 없다. 보다 정확한 해를 구하기 위해 점성저층에 대한 해석이 요구되고, 이를 만족시키기 위해서는 벽면근처에 종횡비(aspect-ratio)가 매우 큰, 높은 격자 밀집도의 확보가 요구된다. 이러한 요구 조건을 만족하는 CFX-11의 수치기법의 핵심은 질량과 운동량 방정식

의 연동화(coupled formation)이다. CFX-11은 압력기반 유한 체적법(finite volume method)을 fully implicit 이산화하여 얻어지는 방정식을 algebraic multigrid coupled solver를 이용하여 해석한다. SIMPLE 등 고전적인 segregated 접근방법에 비해 implicit coupling 방법은 수렴을 가속시키고, 압축성 유동에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있고, 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있는 장점을 갖는다.

유체기계에서 난류모델의 적용에 있어 아주 간단한 난류모델도 충분한 정확도를 제공한다는 입장과 해석 정확도의 확보를 위해서는 가장 최신의 난류모델과 천이 모델을 사용해야 한다는 견해가 있다.

이러한 견해의 차이는 해석의 문제가 서로 다르고 요구되는 정밀도에 대한 만족범위가 다르기 때문이다. 많은 경우, 특히 유체기계의 설계점 영역에서는 점성과 난류효과는 단지 전체 손실에 미소한 추가적인 기여를 하며, 이러한 유동장에서는 난류모델이나 천이모델의 정밀도가 상대적으로 중요하지 않다. 그러나 1-방정식 모델이나, 2-방정식 모델은 계산시간을 크게 증가시키지 않으므로, 해석의 일관성을 위해 적절히 사용하는 것이 좋다. 본 연구에서는 상업적으로 널리 사용되고 있는  $k-\varepsilon$  난류 모델을 적용하였다. 정수장 시설물에 설치하여 운영한 수차의 유동 분석을 위한 모델링은 Fig.3.1에 보이는 것과 같이 구성하였다.

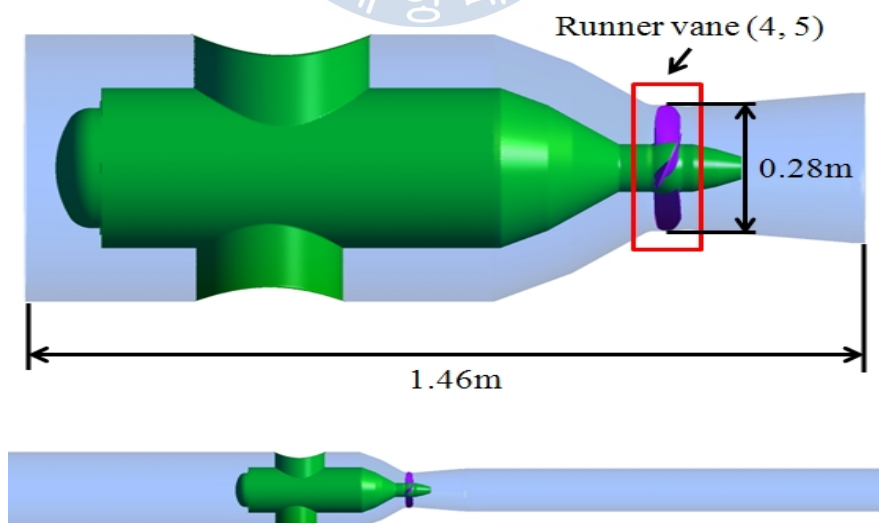


Fig.3.1 Schematic view of micro tubular turbine for CFD

### 3.2 계산격자

컴퓨터 계산조건은 ANSYS ICEM CFD 11.0을 이용하여 Mesh를 구성하였으며, 분석은 Ansys CFX 11.0을 이용하였다. 계산격자로는 Hexa-hedra 격자를 채용하여 전체유동장에 대해서 1,170,546개의 격자(runner vane 1,078,480개 + casing 173,636개)를 적용하였다. 구성된 격자의 형상 및 입력, 출력 조건을 Fig.3.2와 같이 보이고 있다. 실험은 날개 4매를 적용한 결과와 5매를 적용한 결과로 나누어 수행하였으며, 사용된 날개의 형상은 동일하게 구성하였다. 또한 유체는 상온 15도 물을 사용하였고, 입력유량은  $0.38\text{m}^3/\text{sec}$  기준으로 압력은  $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 적용하여 수차출력은 21kW를 기준으로 입력하였으며, 별도의 조건을 추가로 구성하였다. 이는 정수장 시설 물의 조건을 적용한 결과이며, 정격지점의 조건을 만족하지 못하므로 실질적인 수차의 효율은 매우 낮게 나타나고 있으나 조건을 그대로 적용하여 분석을 수행할 수 있도록 하였다.

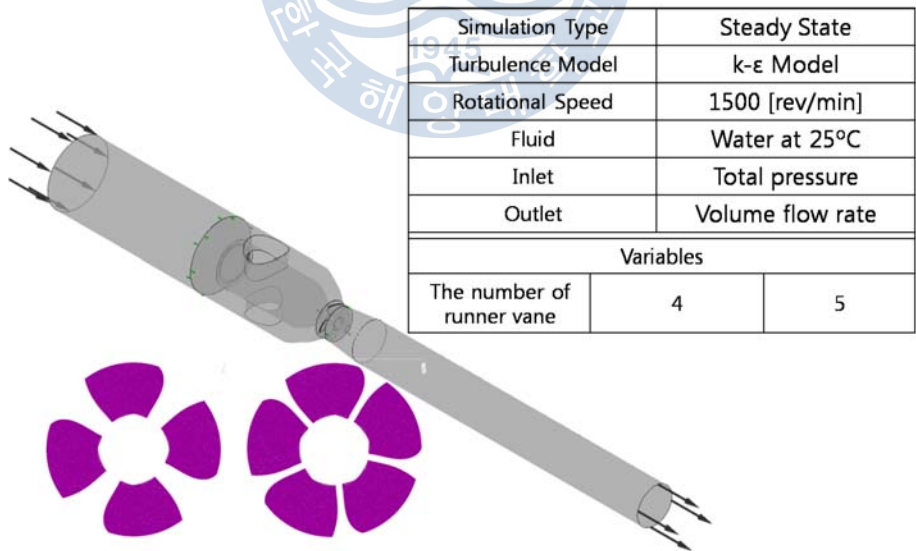


Fig.3.2 Computational domain of the turbine model

### 3.3 지배방정식

지배정식은 유체의 흐름을 예측 할 수 있는 수학적이고 물리적인 방정식으로 구성되어 있다. 또한 상황에 맞는 수학적 방정식과 물리적인 알고리즘이 중요하기 때문에 다양한 방정식을 적절하게 사용해야 한다. 일반적인 유체해석에서 다루는 방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이고, 각각 식(3.1), (3.2), (3.3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mu_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j \rho \mu_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H - P) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j \tau_{ij}) + S_{u_i} \quad (3.3)$$

여기서,  $\rho$  : 밀도

$u_i$  : 속도

$P$  : 압력

$\mu$  : 점성계수

$H$  : 전엔탈피

$h$  : 정적엔탈피

$T$  : 온도

$\tau_{ij}$  : 응력텐서

상태방정식  $\rho = \rho(P, T)$ , 점성계수와 변형률의 함수로써 응력텐서의 응력-변형률 관계, 그리고,  $h = h(P, T)$ 가 이들 방정식에 추가된다. 난류유동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 대해 쓴다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.



### 3.4 난류모델링

난류 모델은 평균성분과 변동성분을 도입하여 수정된 수송 방정식(transport equation)의 해를 구하기 위한 수단이다. 예를 들어, 속도  $U$ 는 평균성분  $\bar{U}$ 와 시간에 따른 변동성분  $u$ 로 나눌 수 있다.

$$U = \bar{U} + u \quad (3.4)$$

여기서 ,

$$\bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U dt \quad (3.5)$$

$\Delta t$ 는 난류의 변동 scale보다 상대적으로 큰 시간 scale이지만, 방정식을 푸는 전체 시간보다는 작은 시간 scale이다. 원래의 수송방정식에 시간 평균된 물리량을 대입하면 식(3.6), 식(3.7), 식(3.8)과 같은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (\tau - \overline{\rho u \otimes u}) + S_M \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \overline{\rho u \phi}) + S_E \quad (3.8)$$

여기서  $\tau$ 는 분자 응력 텐서(molecular stress tensor)이다.

연속방정식은 변화가 없으나, 운동량과 스칼라 수송방정식은 레이놀즈 응력 항인  $\overline{\rho u \otimes u}$ , 그리고 레이놀즈 유속,  $\overline{\rho u \phi}$  등, 분자 확산 유속에 난류 유속항을 더한 항을 포함하고 있다. 이들 항은 비 평균화 방정식의 비선형 대류항으로부터 나타난다. 이 항들은 turbulent velocity fluctuation에 의한 대류는 molecular level에서의 thermal fluctuation에 의해 야기되는 혼합보다 더 크

다는 사실을 나타낸다. 고 레이놀즈수에서, turbulent velocity fluctuation은 thermal fluctuation의 평균자유경로(mean free path)보다 훨씬 큰 길이 스케일을 갖는다. 따라서, 난류 유속은 분자 유속보다 훨씬 크게 된다. Reynolds Averaged Energy 방정식은 식(3.9)과 같다.

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot} + \overline{\rho u h} - \lambda \nabla T) = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.9)$$

여기서 평균된 전체 엔탈피는 식(3.10)와 같이 주어진다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (3.10)$$

전엔탈피(total enthalpy)는 평균운동에너지(mean kinetic energy)와 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)를 포함한다. 여기서 난류운동에너지는 식(3.11)과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u^2} \quad (3.11)$$

$k$ 는 난류 운동 에너지이며, 속도 변동의 분산으로 정의되고, 차원은 (L<sup>2</sup>T<sup>-2</sup>) 즉,  $m^2/s^2$ 이다.  $\varepsilon$ 은 난류 소산율(turbulence eddy dissipation)이고 단위시간당  $k$ 의 차원을 갖는다. 즉, (L<sup>2</sup>T<sup>-3</sup>),  $m^2/s^3$ 이다.  $k-\varepsilon$  모델은 기본 방정식에 2개의 변수가 추가된다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.12)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (3.13)$$

여기서  $B$ 는 body force의 합이고,  $\mu_{eff}$ 는 난류를 고려한 유효 점성이다. 그리고,  $p'$ 은 식(3.14)과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (3.14)$$

0-방정식 모델과 같이,  $k-\varepsilon$  모델은 와점성 개념에 기초한다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.15)$$

여기서  $\mu_t$ 는 난류 점성이다.  $k-\varepsilon$  모델은 난류 점성을 난류 운동에너지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

여기서  $C_\mu$ 는 상수이다.

$k$ 와  $\varepsilon$ 은 난류 운동에너지와 난류 소산율에 대한 식(3.17), 식(3.18)의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.18)$$

여기서  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ 는 모델상수이다.  $P_k$ 는 점성과 부력에 따른 난류 생성항이며, 식(3.19)과 같이 표현된다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \Delta U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_k \quad (3.19)$$

비압축성 유동에 대해,  $\nabla \cdot U$ 는 작고 오른쪽 두 번째 항은 생성에 크게 기여하지 않는다. 압축성 유동의 경우  $\nabla \cdot U$ 는 shock이 발생하는 구역에서만 큰 값을 갖는다.  $3\mu_t$ 항은 "frozen stress"가정에 기초한다. 이 값은  $k$ 와  $\varepsilon$ 값이 shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

### 3.5 수치해석 결과

수치해석은 러너 날개를 4매와 5매로 나누어 수행하였으며, 러너의 개도 조건은 10~18도 범위에서 2도씩 분할하여 수행하였다. 또한 유량 및 낙차의 변동에 따른 조건은 4가지로 나누어 입력하였으나, 이는 정수장 시설물내 설치를 위한 초기 설계조건과는 상이한 실제 현장 운전조건을 그대로 적용하여 CFD 분석을 수행하였다. 그 결과 전체적인 실험 조건에서 수차의 효율이 80%를 넘지 못하고 있으나 정수장 조건이 개선되어 설계점에 이르는 유량을 확보하여 러너의 개도를 크게 할 경우 효율이 향상 될 수 있음을 예측할 수 있다. Fig.3.3과 Fig.3.4에 보이는 것과 같이 날개 4매를 적용할 경우와 날개 5매를 적용할 경우에 있어서 유효낙차가 약 7~10m에 이르는 구간에서 성능의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 동일한 유량조건에서 날개의 매수에 따른 특성을 비교분석한 결과 Fig.3.5에 보이는 것과 같이 날개의 매수가 많아질수록 수차에 적용하는 압력의 값이 높아지며 상대적으로 효율은 감소하여 출력이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 5매의 날개로 관내 유수의 흐름을 방해하여 압력의 상승을 초래하게 되고 이러한 압력의 과도한 상승이 효율의 저하를 일으키는 것으로 분석되었다. 반면, 4매의 날개를 이용하여 동일한 유량조건으로 운전을 수행할 경우 배관 내 압력이나 효율, 출력이 설계점에 근접하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig.3.6에서는 날개의 개도가 12도에서 18도까지 2도씩 증가하는 조건으로 동일한 유효낙차를 적용하였다. 날개의 매수가 4매일 경우와 5매일 경우의 통과 유량은 약 10%의 차이를 보

이고 있으며, 4매의 날개를 적용한 경우의 효율이 5매일 경우보다 높게 나타났다. 동일한 조건에서 운영할 경우 10m이하의 조건에서는 4매를 적용하는 것이 효율적임을 보여주고 있으며, 가능한 4매의 날개를 적용하여 운전하는 것이 운전에 있어서 안정적이므로 추후 날개의 성능향상을 위한 연구를 수행하여 4매의 날개로 대응 가능한 낙차의 범위를 넓히는 연구가 추가로 수행되어야 할 것으로 판단하였다. 현재의 날개를 기준으로 10m 초과 범위에서 4매 수차를 사용할 경우 회전수의 상승, 캐비테이션 발생으로 인한 수차의 손상이나, 수명의 단축, 진동 및 소음의 발생이 우려되므로 적용에 제한을 받을 것으로 보인다.

Fig.3.7과 Fig.3.8에 보이는 터빈내부의 압력분포를 보면 낙차에 따른 날개의 매수와 개도에 따른 차이를 명확하게 보이고 있다. 또한 Fig.3.9와 Fig.3.10에서는 동일유량조건에서 날개의 매수에 따른 중간단면에서의 속도벡터를 보이고 있다.



Fig.3.2 Computational domain of the turbine model

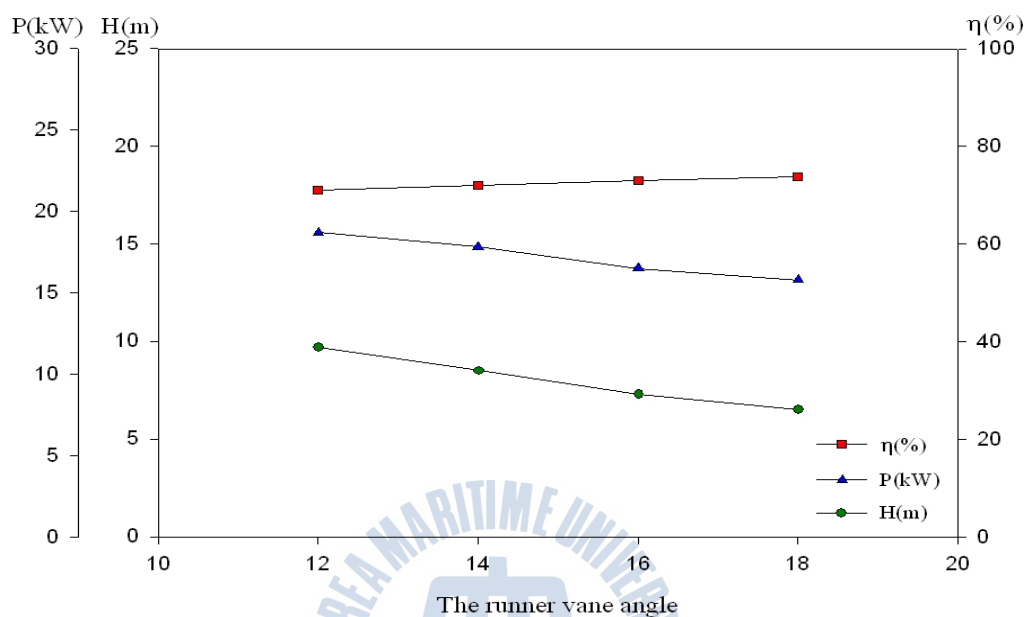


Fig.3.3 Characteristic curves runner blade 4.

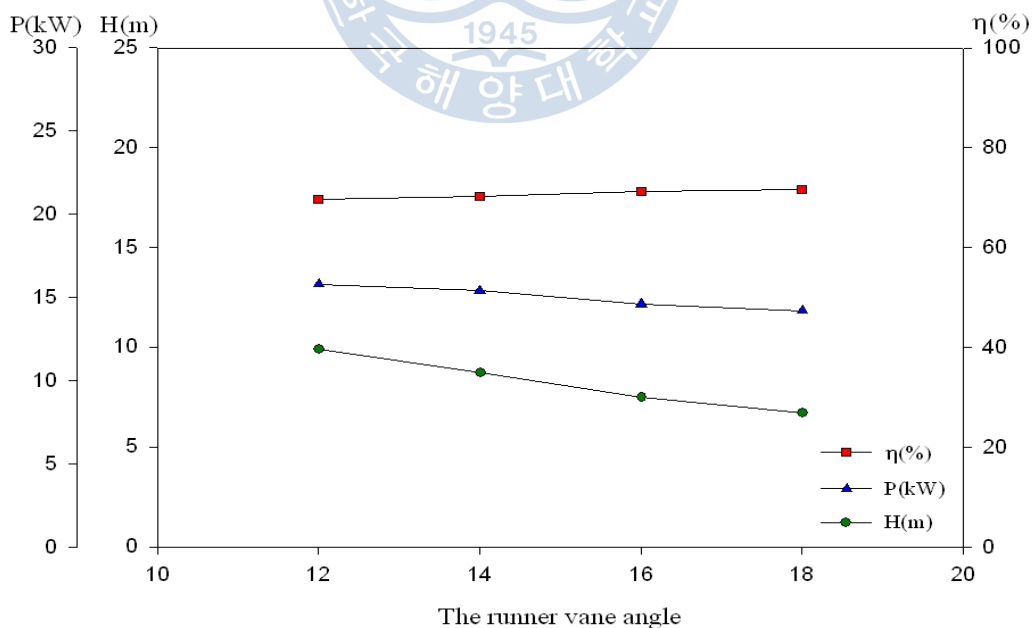


Fig.3.4 Characteristic curves runner blade 5.



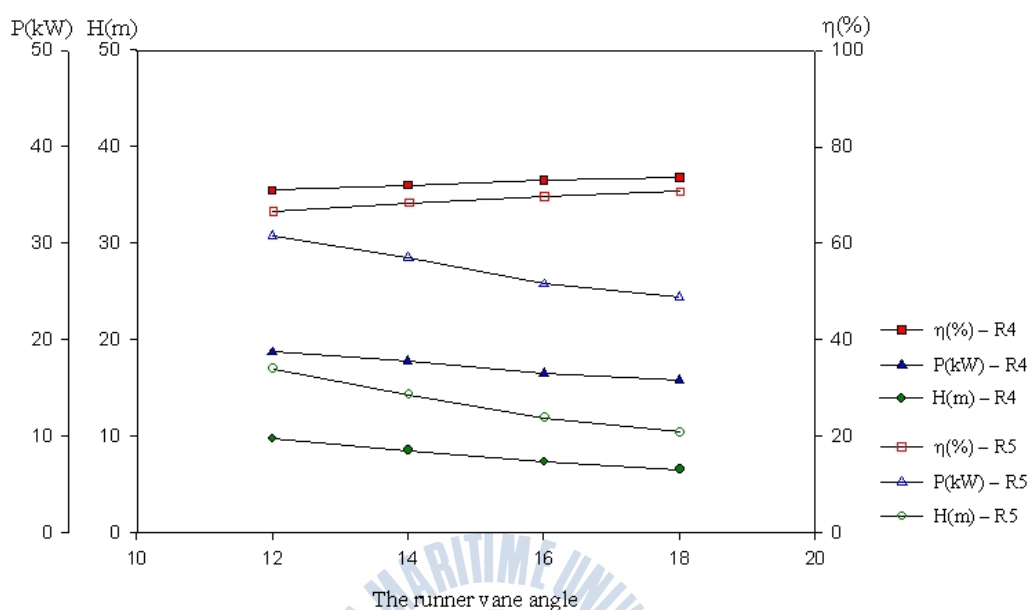


Fig.3.5 Characteristic curves compare 5 blade with 4 blade in same flow rate condition

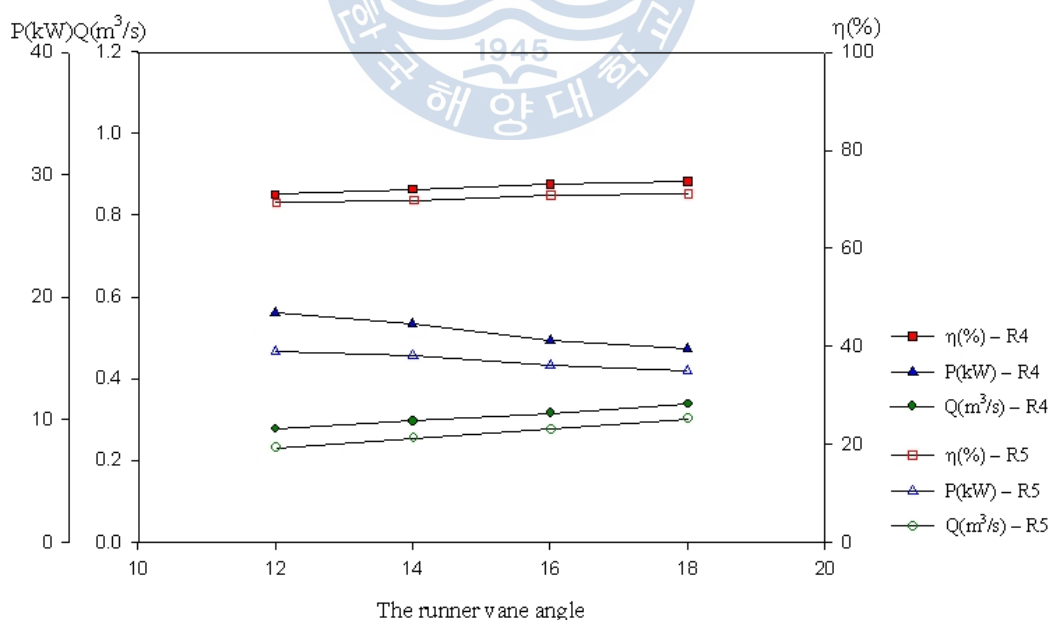


Fig.3.6 Characteristic curves compare 5 blade with 4 blade in same efficiency head condition

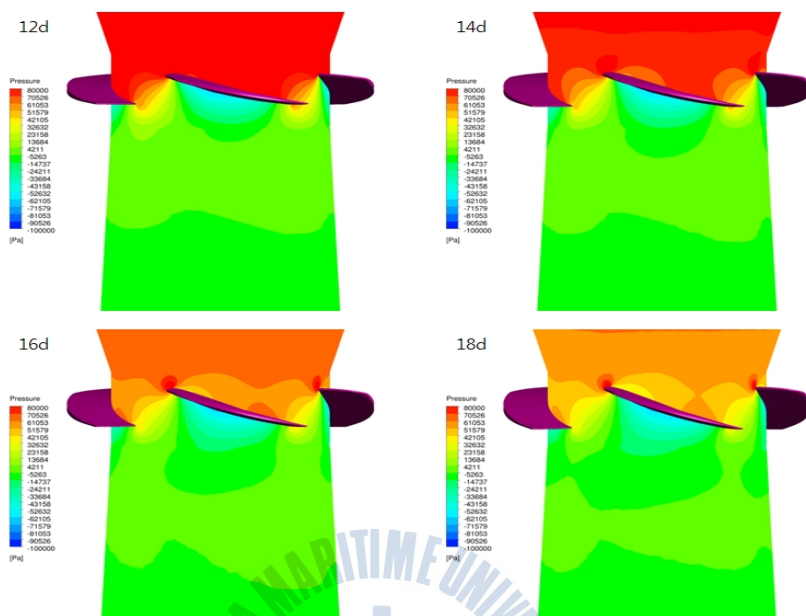


Fig.3.7 Characteristic curves runner blade 4 .

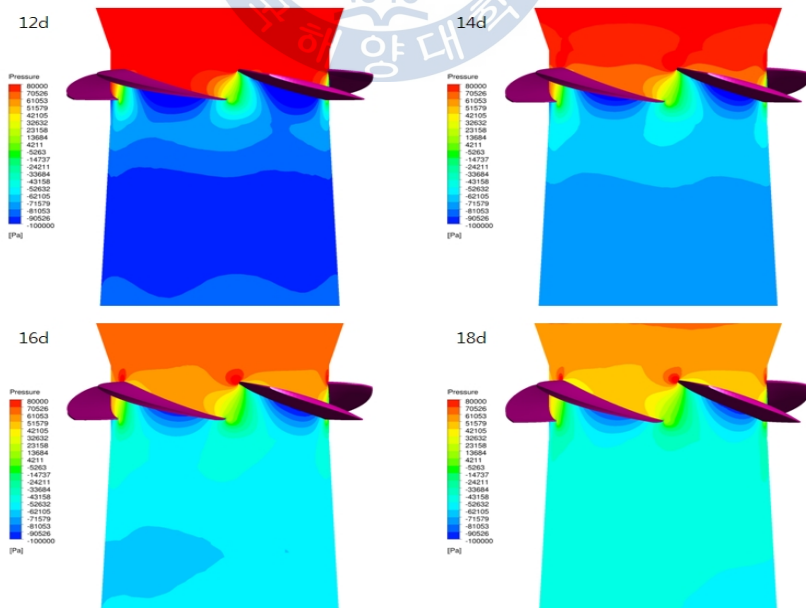


Fig.3.8 Characteristic curves runner blade 5.

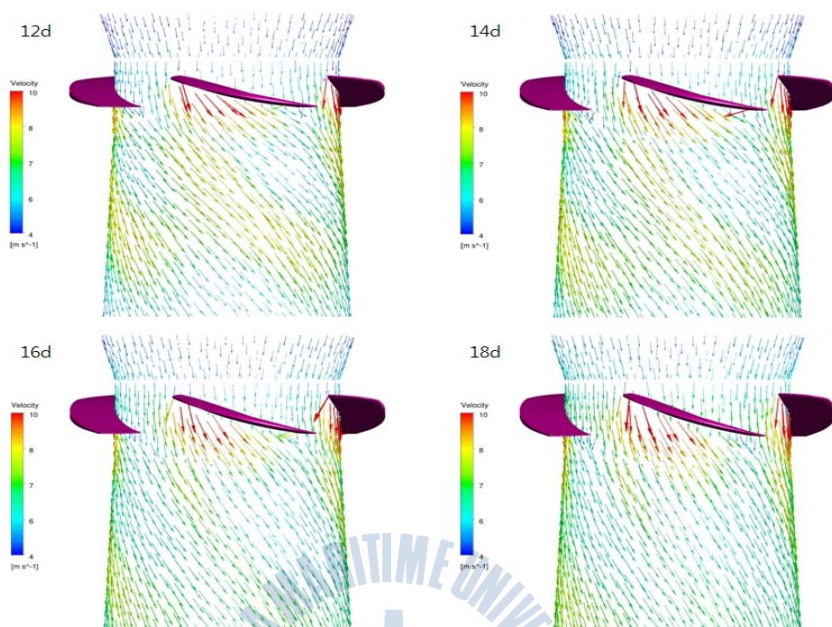


Fig.3.9 Characteristic curves runner blade 4.

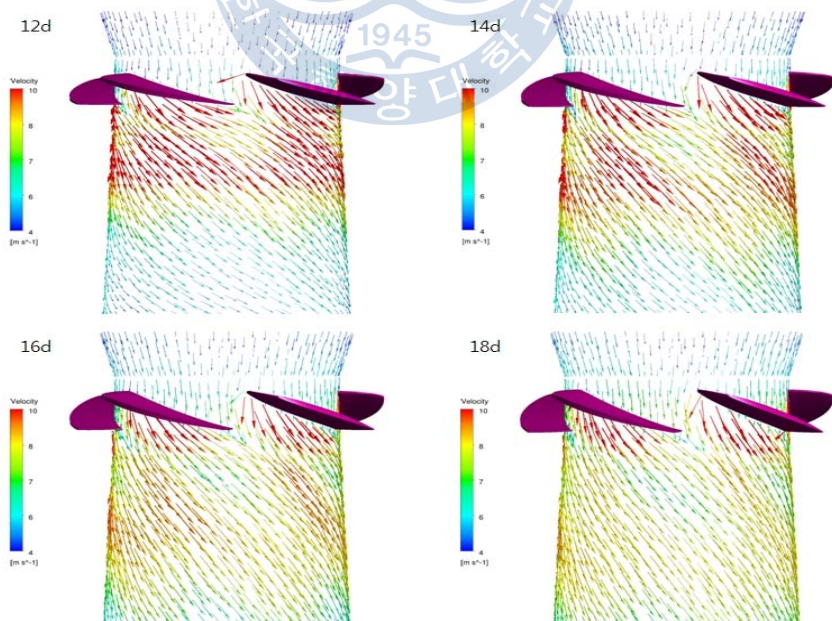


Fig.3.10 Characteristic curves runner blade 5.

## 제4장 해양배출수를 이용한 저낙차용 튜블러 수차의 성능특성

### 4.1 저낙차용 튜블러 수차의 운전

해수를 이용한 발전시 고려해야 할 사항은 흡출관을 통하여 해안으로 배출되는 해양소수력 발전의 경우 출구압력의 변동을 고려한 설계를 수행해야 하는 것이다. 일반적으로 1MW 이상의 발전출력을 가지는 화력발전소 방류수를 이용한 발전소의 경우 이러한 해수면의 변화에 대한 검토를 충분히 수행하여 토목공사와 병행하여 이루어 지고 있다. 또한 국내 대형 석탄 화력발전소의 냉각수에 적용된 해양 배출수를 이용한 사례에 대한 연구는 앞선 연구자들에 의하여 수행되었다.<sup>[7-8][23]</sup> 하지만 본 연구에 적용된 소수력 발전용 튜블러 수차는 아직 국내에 적용된 사례가 없으며, 특히 양식장의 방류수를 이용한 발전설비로써 양식장의 운영에 전혀 영향을 미치지 않고 운영될 수 있도록 설계되었다. Fig.4.1에 보이는 발전소의 조감도에서 보듯이 기존의 화력발전소 냉각수의 방류수구에 설치된 발전소와는 조건이 다르며, 사용낙차가 2m이내에 머무르고 있으므로 환경적 요인에 대한 검토사항이 필요하다. 해수의 유입 방지 및 발전설비 보호를 위한 밸브를 포함한 발전설비의 주요 배치를 Fig.4.2에 보이고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 Fig.4.3에 보이는 것과 같이 해당 제주 성산포 지역의 설계 시점 조위표에 따르면 일별, 월별 해수면의 변동폭이 최대 2.5m에 이르는 것을 알 수 있다. 이는 러너 전 후단의 압력차를 이용하여 발전을 수행하는 튜블러 수차의 운전특성을 고려할 때 중요한 인자로 고려되어야 한다. 특히 통상 하루 2번의 간조와 만조를 동반하는 평균 해수면의 편차는 설계시 반드시 고려되어야 한다. 본 연구에 적용된 수차의 설계에도 유효낙차 산정의 기초가 되는 평균해수면(mean sea level)의 높이는 1.25m이나, 해수면의 최고조 값과 최저조값을 고려한 발전소의 건설을 고려하였다. Table 4.1에는 발전소 운전을 위한 기초 데이터를 보이고 있다.

수차의 건설과 함께 실제 발전소의 운영조건을 검측한 결과 발전소 건설시 나타난 제주도 지형의 특성으로 인하여 유효낙차의 감소현상이 일어났다. 특히 기초 토목 공사시 발생한 용출수 현상은 화산암을 기반으로 하는 제주도의 특징을 그대로 반영해 주었을 뿐 아니라 지역 문화의 특징인 해안가 덩장의 보존 요청 민원으로 인하여 Fig.4.4와 같이 간조시 수차 출구측 해수면이 실제 해수

면보다 약 0.5m 이상 높게 형성되는 현상이 발생하였다. 이는 수차의 유효낙차에 그대로 적용되어 운영상의 최대 유효낙차가 약 1.4m에 머무르게 되었다.

Table 4.1 : Specifications of test hydro turbine

| Type                    |                      | Horizontal axis tubular |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| Rated output power      | [kW]                 | 30                      |
| Head                    | [m]                  | 2.0                     |
| Flow rate               | [m <sup>3</sup> /s]  | 2.75                    |
| Rotational speed        | [min <sup>-1</sup> ] | 200                     |
| Turbine center location | [EL.m]               | EL. -3.474              |

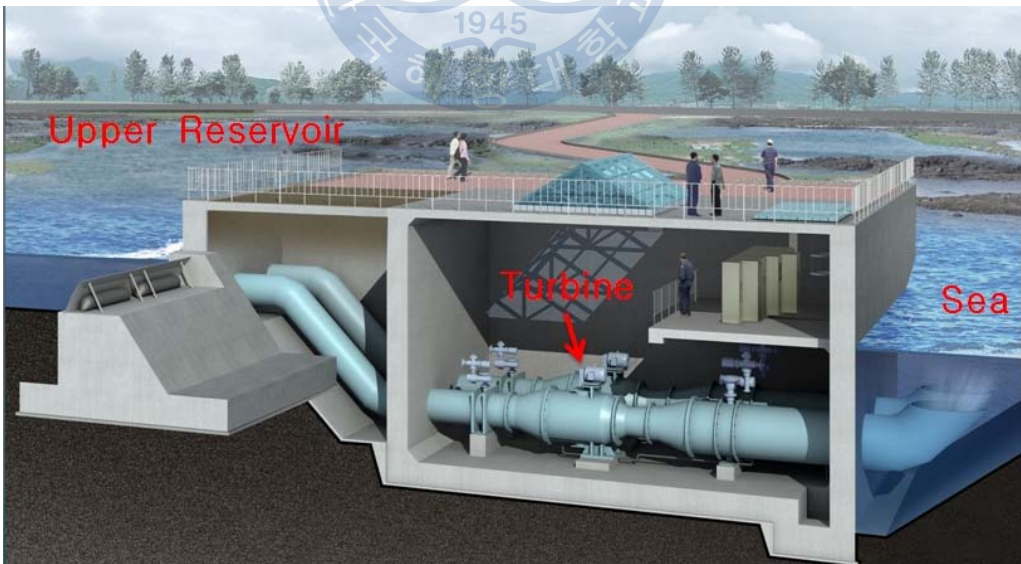


Fig.4.1 Aerial view of marine small hydropower plant at Jeju Hangwonri.



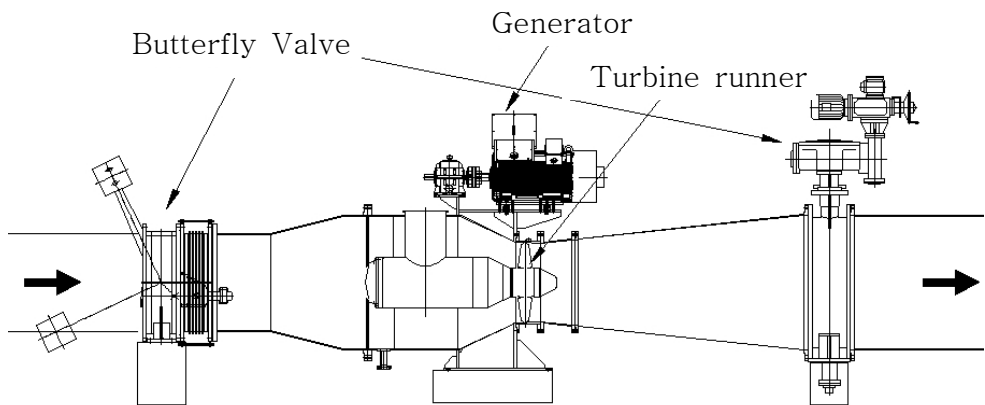


Fig.4.2 Cross-sectional view of test tubular turbine.

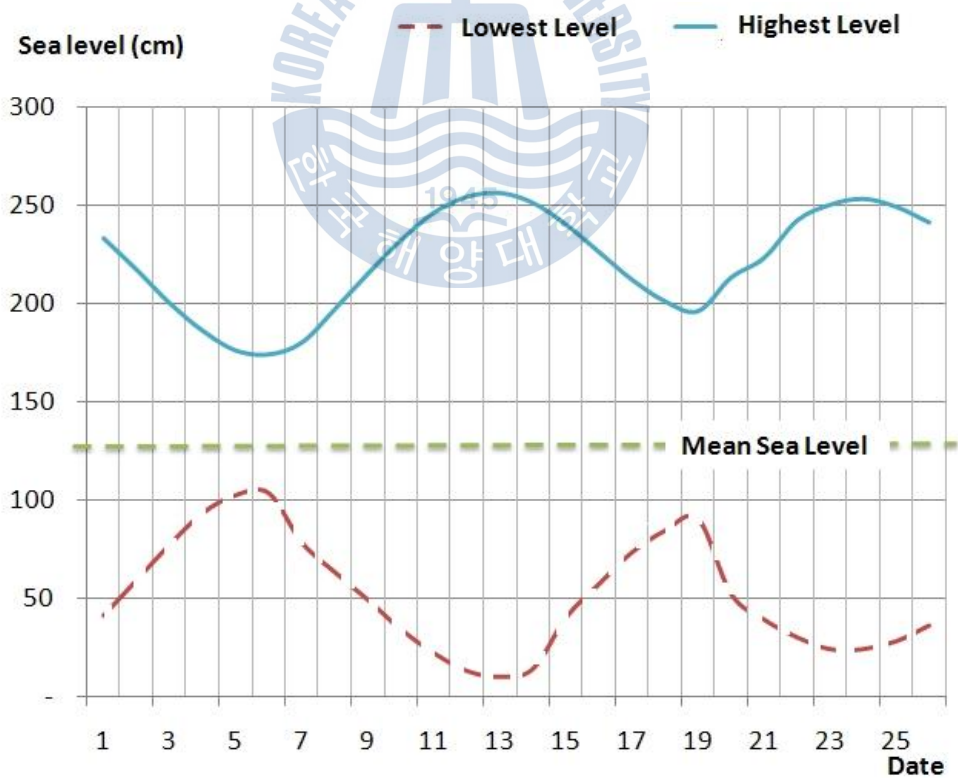


Fig.4.3 Distribution of sea level in Seongsanpo (Jeju.)



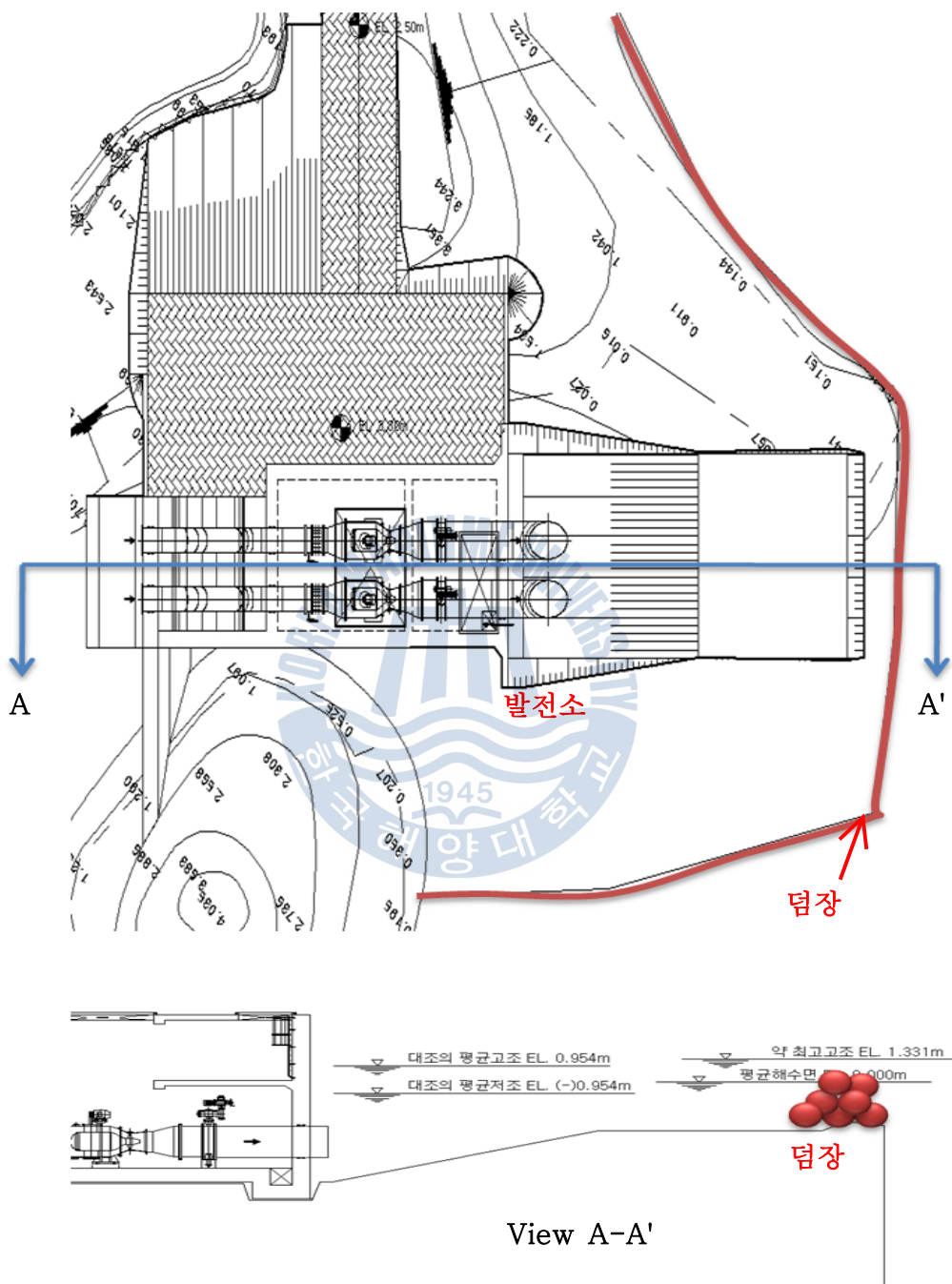


Fig.4.4 View of artificial dam located in outlet side

## 4.2 수차의 성능

### 1) 성능시험 방법

종합성능시험 중에서 자동기동시험, 자동정지시험, 부하차단시험, 비상정지시험, 부하시험, 진동·소음시험 등은 적합이 확인되었으며, 본 연구에서는 현장 상황으로 인한 유효낙차의 확보가 어려워 출력시험과 수차효율시험을 주요 검토사항으로 하였다. 본 연구의 성능 시험을 위한 전제 조건으로 최소출력 7kW, 정격출력 30kW, 최대출력 60kW 이상(30kW×2기)의 3종류의 출력을 만족하는 성능시험 결과를 도출하는 것을 목표로 하였다. 발전기 출력은 Power-meter로 측정된 발전량을 사용하였으며, 러너 개도에 따른 수차 성능을 검토하였다. 유효낙차는 튜블러수차의 상류측과 하류측 유입관 벽면에 설치된 정압공을 통하여 정압을 측정하고, 그 차압과 흐름에 의한 동압의 합으로 유효낙차를 산출하였으며, 정격출력 및 최대출력시험을 위한 유효낙차 2m 이상의 시험조건에서는 현장상황에 의해 유효낙차가 확보되지 못하였기 때문에 Fig.4.5와 같이 앞절에서 언급한 중낙차 터빈의 실험을 통하여 나타난 H-Pt곡선에 근거하여 정격출력 및 최대출력 범위에서의 유효낙차 및 출력값으로 하였다.

한편, 유량에 대해서도 현장시험에서의 시험조건 상 수차성능시험 전범위에 대한 유효낙차를 확보할 수 없었기 때문에 Fig.4.6의 낙차의 산정과 마찬가지로 수차모델시험에 의한 H-Q곡선에 근거하여 유량값으로 하였다.

실험조건으로서, 최소 출력시험에서는 수차 1호기와 2호기의 러너 베인 개도를 동일하게 30% 개방한 상태에서 수행하였고, 정격 및 최대 출력시험에서는 1호기와 2호기의 러너 베인 개도를 동일하게 70% 개방한 상태에서 실험을 수행하였다.

수차효율에 대해서는 초음파유량계법에 근거하여 수차의 상대효율을 산출하였다. 이 방법은 주파수차를 이용한 초음파법에 의해 수압관내의 유속을 측정하고, 유량의 상대치를 구하거나, 낙차에 대한 유량 계산식(4.1)로 상사하여 유량 상대치를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 낙차에 의한 유량 계산식을 이용하여 유량 상대치를 구하였다.

$$Q = 0.089H^3 - 0.548H^2 + 1.791H + 0.556 \quad (4.1)$$

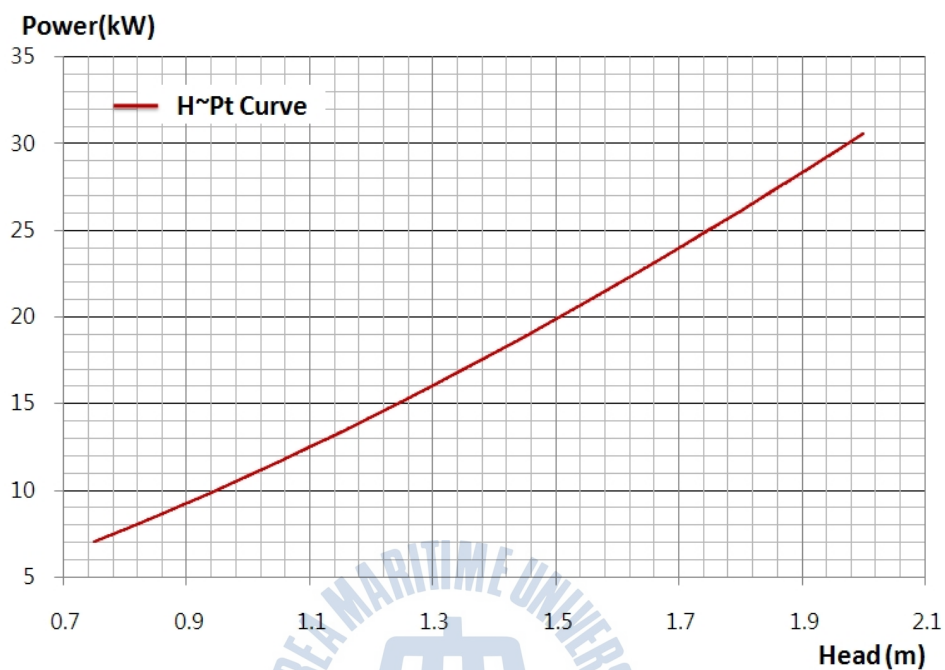


Fig.4.5 Estimated tubular turbine H-Pt curve by model test.

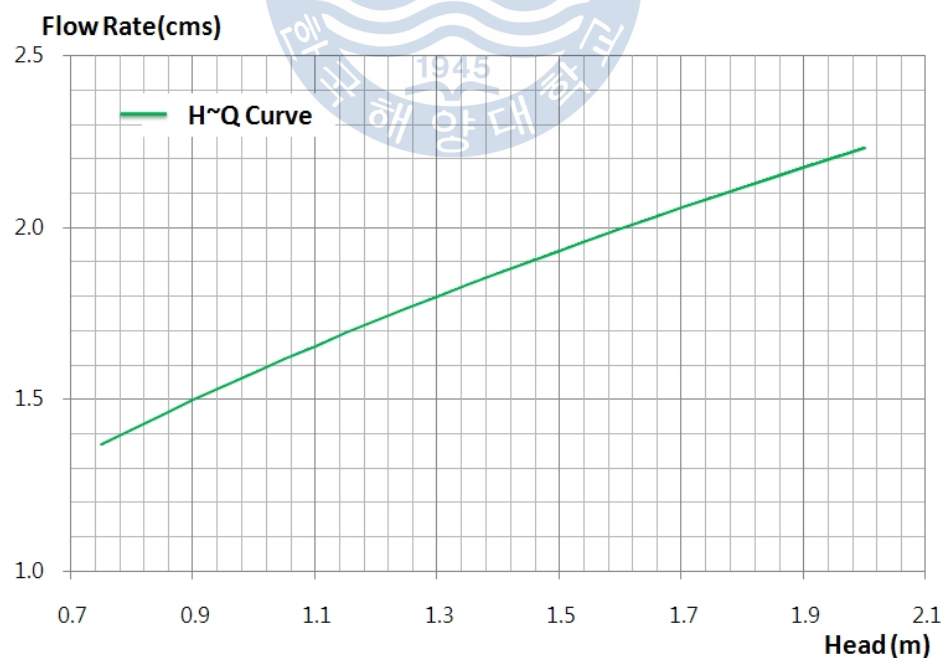


Fig.4.6 Estimated tubular turbine H-Q curve by model test.

수차발전기의 성능시험 측정방법은 수력발전소 건설 발주자, 건설사, 수차제조사간의 협의에 의하여 JEC-4002에 근거하여 수행하였으며, 시험점은 효율을 보증할 전체 범위를 포함하도록 선정하고, 원칙으로서 4점 이상으로 한다. 본 연구에서는 최고효율점 유량에서 부하 25%, 50%, 75%, 100% 및 무부하 100% 유량에서 시험을 실시하였다.

각 시험점에 대해서 측정회수는 원칙으로 2회로 하였으며, 1회의 측정을 행한 시간은 5분 이상으로서, 이 시간 중에 10회를 읽어 기록하였다.

시험 중, 러너개도의 변동을 방지하도록 하였으며, 동일 부하의 시험에 있는 변동 비율은 회전수 변동은  $\pm 0.3\%$  이내, 유효낙차의 변동은  $\pm 0.7\%$  이내, 측정부하 또는 러너개도의 변동폭은  $\pm 1.0\%$  이내로 하였다. 부하의 설정이 끝난 뒤 가동보의 댐수위, 회전속도 등이 안전상태 및 각 측정장치가 정상인지를 확인하고 측정하였다.

본 연구에서 적용한 수차효율 산정을 위한 계산식은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{P_G}{\eta_G} \times 100 \quad (4.2)$$

$$P_h = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000} \quad (4.3)$$

$$\eta_T = \frac{P_m}{P_h} \times 100 \quad (4.4)$$

$$Q_c = Q \times \sqrt{\frac{H_r}{H}} \quad (4.5)$$

$$P_c = P_m \times \left( \frac{H_r}{H} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.6)$$

여기서,  $P$ ,  $H$ ,  $Q$ ,  $\eta$ 는 각각 출력, 유효낙차, 유량, 효율을 나타내고,  $g$ 와  $\rho$ 는 각각 중력가속도와 해수밀도를 나타낸다. 또한, 하첨자  $m$ ,  $G$ ,  $h$ ,  $T$ ,  $c$ ,  $r$ 은

각각 기계, 발전기, 수동력, 수차, 환산값, 지정값을 각각 나타낸다.

## 2) 불확도 계산

수차출력 측정의 불확도(estimated systematic uncertainty)는 각 데이터 취득장비를 고려하여 JEC-4002에 따라서 다음의 식으로 계산된다. 실제출력 및 압력값을 취득 장비로부터 구했을 경우, 각 장비들은 정도를 고려하여 측정오차를 계산하여 허용한도를 구하였다. 측정에 사용한 측정기구는 Table 4.2에 보이고 있으며, 효율측정오차는 각 데이터 취득 장비를 고려할 경우 다음의 식(4.7)으로부터 계산하여 $\pm 1.8(\%)$  임을 확인하였다.

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{f_P^2 + f_H^2 + f_{CT,PT}^2} \quad (4.7)$$

$$= \pm 1.8(\%)$$

여기서,  $f_P$ 와  $f_H$ 는 각각 출력 측정오차와 유효낙차에 대한 측정오차이며, 이들 모두  $\pm 0.8(\%)$  종도를 선택하였다. 또한  $f_{CT}$ 와  $f_{CT}$ 는 일종의 전류를 측정하는 변류기와 전압을 측정하는 변성기의 측정오차로 이들 모두 각각  $\pm 1(\%)$  정도를 선택하였다.

Table 4.2 Specification of measuring equipment

| 측정항목  | 측정장비                     | 사양          | 정밀도  | 제작사    |
|-------|--------------------------|-------------|------|--------|
| 발전기출력 | Digital Protection Relay | VAMP255     | 0.8% | VAMP   |
| 입-출구압 | Pressure Transducer      | IGP-10T-22D | 0.3% | KONICS |
| 러너개도  | Stroke Transducer        | LP-50FJ     | 0.3% | MIDORI |

#### 4.2.1 낙차 및 유량의 영향

설계시 적용되었던 2m의 유효낙차는 1.4로 변경되었으며, 이로 인하여 러너를 통과하는 유량의 감소로 이어졌으며 발전출력은 정격에 미치지 못하게 되었다. 최소출력시험은 현재 계측되고 있는 실제출력을 확인하는 시험방법으로서, 본 시험에서는 데이터가 3초마다 계측되므로 10분을 평균하여 그 평균치를 최소출력으로 결정하였다. 최소출력의 평가기준은 각 단위기 당 7kW로 하여 성능시험일 당일의 12시간 운전상태의 확인과 계측된 최소출력을 기준으로 평가하였다. Table 4.3은 최소출력시험에 의한 계측결과를 나타내고 있으며, 유효낙차 1.4m에서 1호기 및 2호기에서 모두 평균출력이 15kW 이상이므로 최소출력 7kW를 보증함을 확인하였다. 또한 시험은 1호기와 2호기를 각각 수행하여 상호간의 영향은 배제하도록 하였다.

Table 4.3 Averaged measured data by minimum output power test

| Turbine No.                                 | No.1  | No.2  |
|---|-------|-------|
| Runner blade opening angle [%]              | 30    | 30    |
| Ave. inlet pressure [kgf/cm <sup>2</sup> ]  | 0.51  | 0.50  |
| Ave. outlet pressure [kgf/cm <sup>2</sup> ] | 0.36  | 0.36  |
| Ave. effective head [m]                     | 1.4   | 1.4   |
| Ave. generator output power [kW]            | 15.38 | 15.04 |

Fig.4.7은 12시간 동안의 10분단위 평균출력 데이터를 나타낸 것이며, 발전소 하류 방출구측의 조수간만에 따른 수위차에 근거한 유효낙차의 변화에 따라서 출력값의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 측정시점은 조수간만의 변화가 적은 날을 선정하여 수행하였으며, 측정값은 간조와 만조시 해수면 높이의 차이가 크지 않아 Fig.4.7에서의 최대출력과 최소 출력의 차이 역시 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.



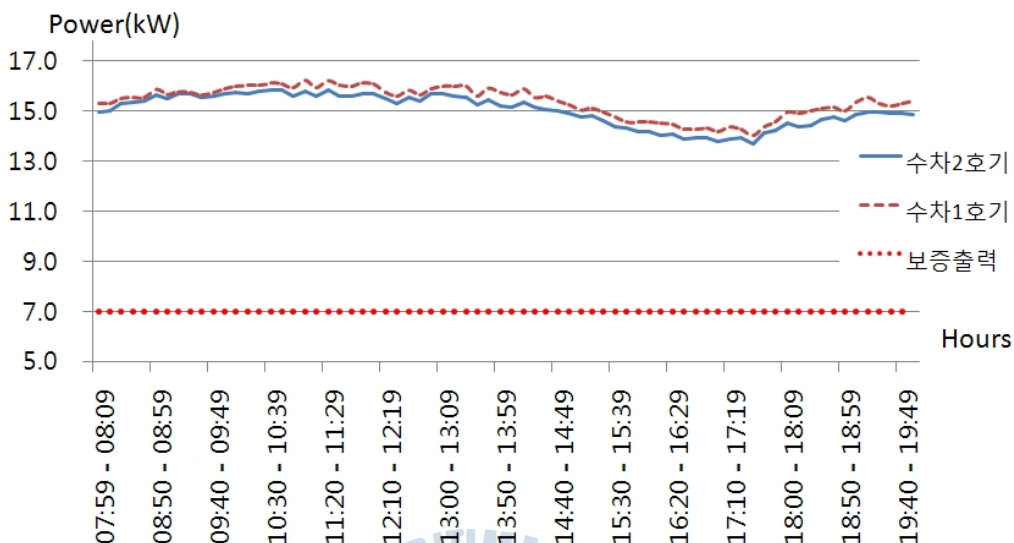


Fig.4.7 10 minutes averaged output power curve.

Fig.4.8은 낙차변화에 따른 실제 출력과 예상출력값의 비교를 나타내고 있다. 예상출력값은 유효낙차와 함께 증가하지만, 일정 낙차 이상 영역에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 예상출력값이 유효낙차의 증가에도 불구하고 일정하게 나타나는 것은 발전소의 측면에 설치된 가동보의 저수량이 최대 저수량을 넘어설 경우 자연적으로 넘침 현상이 일어나므로 상류측 수위는 항상 일정하여 유효낙차의 변동이 없음을 보이고 있다. 그러나 실제로 조수간만의 차로 인하여 출구측 수위의 변동이 있으므로 유효낙차의 변동이 있을 수 있으나 예상출력값 결정의 단계에서는 이를 고려하지 않았다.

토목공사 후 설치된 수차의 운영 시 측정된 유효낙차 1.4m에서 측정된 출력은 Fig.4.8에서 17kW를 보이고 있다. 이것은 예상성능곡선상의 추정값과 거의 일치함을 보이고 있으며, 유효낙차가 더 낮게 측정되는 경우에도 출력보증조건은 무난히 만족하고 있음을 보이고 있다. 그러나 데이터 측정결과 상부저수지 (upper reservoir)측에 위치한 수차 유입관 입구측 수중 흐름의 영향에 의하여 2호기측의 유입이 원활하지 못하여, 1호기와 2호기를 동시에 운전하여 측정을 할 경우 각 호기별 유효낙차와 출력에 다소간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 각 호기별 유입 유량이 일정하지 않으며 간헐적인 유수의 흐트러짐에 의하여 유입되지 못하는 현상에서 기인하는 것으로 추정된다.

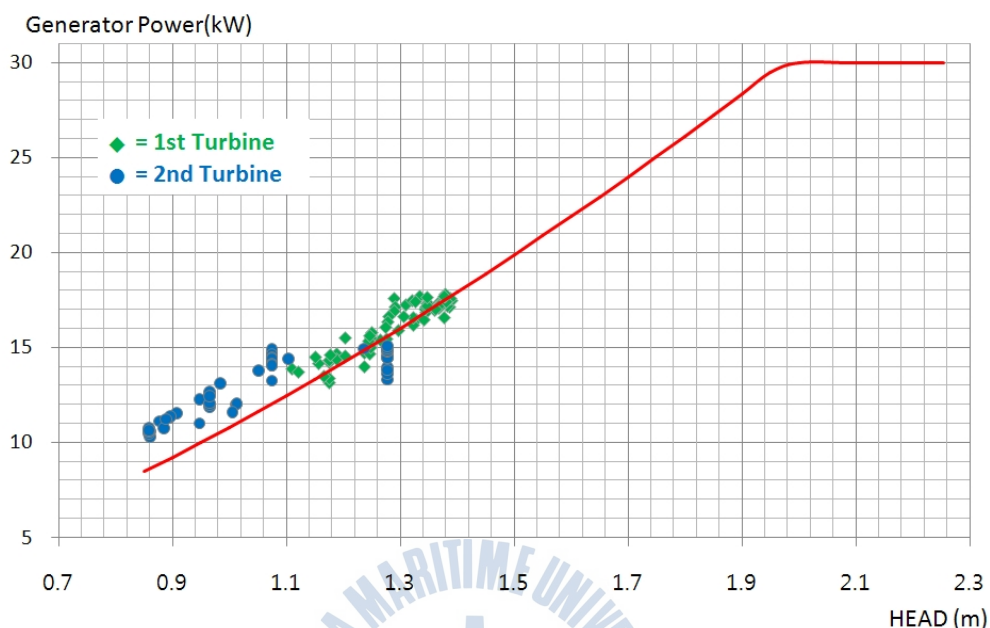


Fig.4.8 Comparison of H-Pt performance curve by the estimated and measured values.

정격출력의 기준인 유효낙차 2m 및 최대출력 기준인 최대유효낙차 2.25m를 현장상황 및 민원 등의 사정으로 확보되지 못하여 정격출력시험 및 최대출력시험은 현장에서 측정한 낙차를 기준으로 보정된 출력으로 환산하여 시험을 실시하였다.

정격출력과 최대출력의 평가기준은 각 단위기당 15kW 및 30kW로 결정하여 성능시험일 당일의 12시간 운전상태를 확인하는 것으로 하였다. 또한 계측된 자료에 의하여 출력의 변동에 따른 출력곡선값 보정결과를 가지고 정격유효낙차가 2.00m 일 때 정격출력 및 최대유효낙차 2.25m 일때 최대출력값으로 기준을 결정하여 평가하였다.

Table 4.4는 정격 및 최대출력시험을 위한 러너베인 개도, 압력, 유효낙차를 나타내고 있으며, 이때의 측정한 값의 평균치에 대한 발전기에서 측정한 효율과 출력을 보이고 있다. 또한 정격낙차 2.0m로 환산했을 경우의 수차와 발전기에서의 환산출력을 함께 나타내고 있다.

Table 4.4 Averaged measured data for the rated and max. output power tests

| Turbine No.  | No.1  | No.2  |
|--|-------|-------|
| Runner blade opening angle [%]   | 70    | 70    |
| Ave. inlet pressure [kgf/cm <sup>2</sup> ]                               | 0.480 | 0.464 |
| Ave. outlet pressure [kgf/cm <sup>2</sup> ]                              | 0.359 | 0.366 |
| Tested effective head [m]  | 1.29  | 1.05  |
| Measured generator efficiency [%]  | 92.48 | 91.49 |
| Measured generator output power [kW]                                     | 16.17 | 13.28 |
| Turbine ave. output power at the corrected effective head of 2.0m [kW]   | 35.38 | 40.40 |
| Generator ave. output power at the corrected effective head of 2.0m [kW] | 31.09 | 35.12 |

Table 4.5와 Table 4.6에 정리한 바와 같이 수차발전기 1호기 및 2호기 모두 12시간 발전기 정격출력시험에서 정격낙차 2.0m로 환산하였을 경우 1호기 31.09kW, 2호기 35.12kW, 최대낙차 2.25m로 환산하였을 경우 1호기 37.19kW, 2호기 42.02kW이므로 최대출력 30kW를 보증할 수 있음을 확인하였다. 1호기와 2호기의 수차 및 발전기의 효율과 출력이 다르게 나타나는 이유는 앞서 언급한 바와 같이 각 수차에 적용되는 유효낙차가 유입량의 차이에 따라서 다르게 나타남에 따라 그 특성값의 차이에 기인하여 발생한다.

성능시험에서의 효율은 수차 본체의 출력으로부터 계산되는 수차효율과 발전기의 출력으로부터 계산된 발전기효율로 나눌 수 있다. 일반적으로 보증효율은 발전기출력을 기준으로 하게 되나, 출력에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 수차의 효율이다. 발전기의 효율은 제작완료 시 공장검수를 통하여 최소, 정격, 최대 지점에 대한 효율을 측정하여 그 값을 기준으로 수차발전기의

전체 효율에 적용하게 된다.

Table 4.5 Generator averaged rated output power test

| Ave. output power (kW) at the rated head |       |       | Averaged guarantee output power(kW) |       |       |
|--|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|
| Total                                    | No. 1 | No. 2 | Total                               | No. 1 | No. 2 |
| 66.21                                    | 31.09 | 35.12 | 60                                  | 30    | 30    |

※ Corrected Head : 2.0m

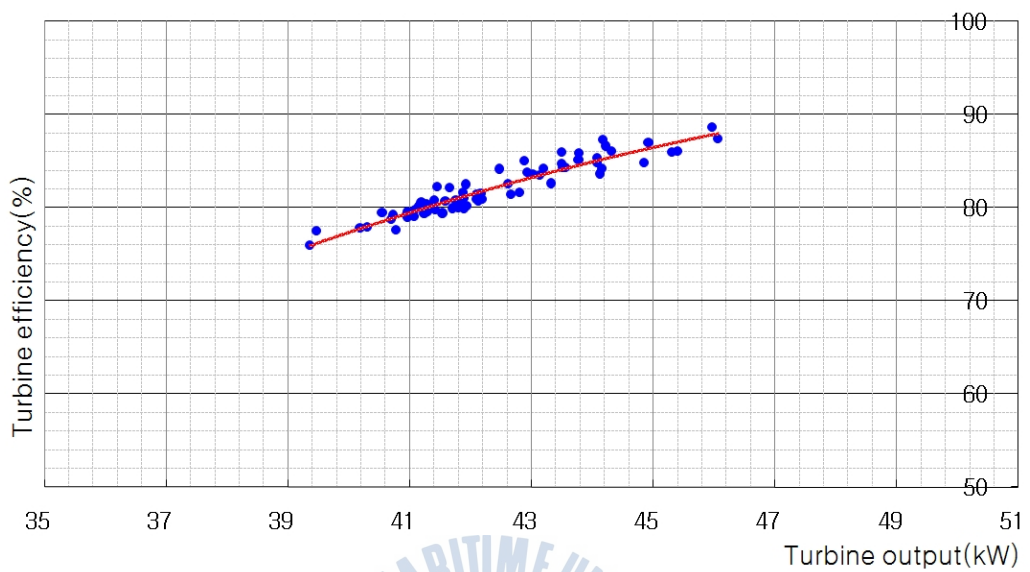
Table 4.6 Generator averaged max. output power test

| Max. output power (kW) at the max. head |       |       | Max. guarantee output power(kW) |       |       |
|---|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|
| Total                                   | No. 1 | No. 2 | Total                           | No. 1 | No. 2 |
| 79.21                                   | 37.19 | 42.02 | over 60                         | 30    | 30    |

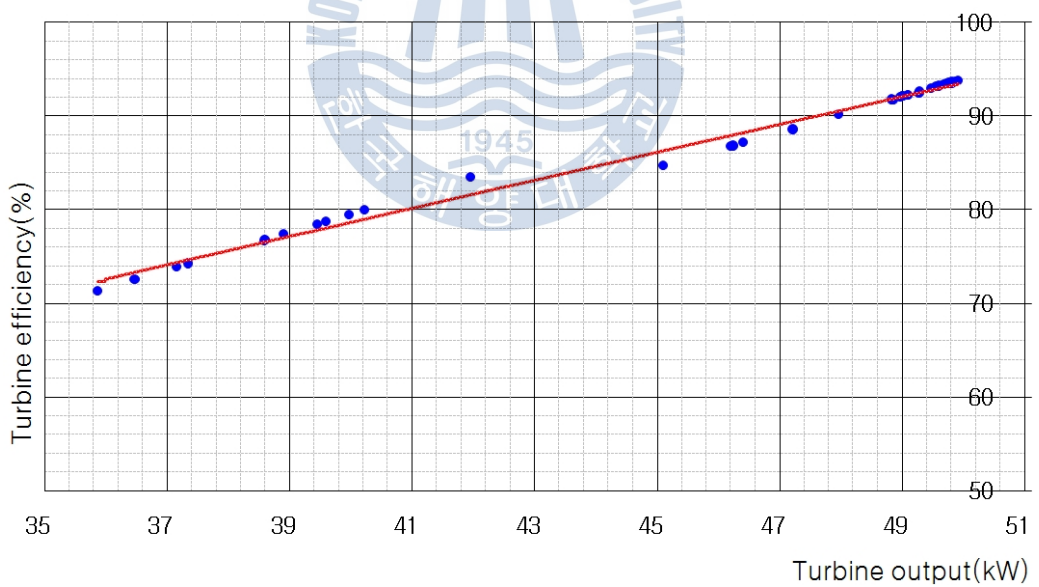
※ Corrected Head : 2.25m

Fig.4.9는 현장시험에서 측정한 낙차와 출력값을 모델시험을 통하여 얻어진 예상 성능곡선도를 이용하여 산출된 정격낙차 2.0m에서의 수차 1호기 및 2호기에서의 보정효율을 나타내고 있다.

1호기와 2호기의 동시 운전 중에 측정한 데이터를 근거로 작성이 되었으며, 압력의 측정범위가 한정되어 상대적으로 압력이 조금만 변경되어도 상사된 출력의 범위는 넓게 나타난다. 2호기의 경우는 현장조건의 특수성이 반영되어 압력의 변동폭이 심하며 상사된 값이 평균값을 기준으로 한 데이터 값의 분포범위가 넓게 나타나고 있다.



(a) Turbine No. 1



(b) Turbine No. 2

Fig.4.9 Efficiency curves of turbine No. 1 and 2 by output power variation at the corrected effective head of 2.0m.

본 연구에서 수행한 성능시험의 결과로부터 효율에 대해서 검토해보면 수차의 보증효율은 80%, 발전기 보증효율은 90%이므로, Table 4.7에 정리된 수차 평균효율에서 불확도를 감안하면 수차의 평균효율이 1호기 77.73% ~ 81.33%, 2호기 78.03% ~ 81.63%이고, 발전기에서의 효율은 Table 4.7의 결과로부터 90%이상이므로 효율을 보증함을 알 수 있다.

Table 4.7 Test results of averaged turbine efficiency at rated output power

| Corr. head (m) | Efficiency of turbine No. 1 at rated output power(%) | Efficiency of turbine No. 2 at rated output power(%) |
|----------------|--|--|
| 2.0            | 79.53  | 79.83  |

#### 4.2.2 조수간만의 차에 따른 영향

Fig.4.10은 2011년 5월 기준 제주 행원리 해안의 조수간만에 따른 하루 동안의 해수면 높이 변동 상황을 나타내고 있다. 하루에 2번씩 간조와 만조가 존재하고, 그 사이에 해수면의 높이가 변동된다. Fig.4.8의 경우 만조 시에는 해수면 최고수위가 1.6m이고, 간조시의 최저수위가 -1.08m로 나타남을 알 수 있다.

본 연구는 해양소수력발전소 튜블러수차의 성능평가를 위한 현장시험 및 그 결과에 대해서 검토한 내용이다. 현장시험에서는 시험장소의 환경요인에 따라서 공장시험에서와는 달리 계측 가능한 인자가 제한적이며, 주어진 계측데이터를 이용하여 제시된 출력 및 효율 보증값에 적합함을 확인시켜야 한다.

따라서, 정격출력 및 최대출력에 대해서는 현장시험 시의 주변 환경요인에 따른 제약조건으로 인하여 적절한 유효낙차를 확보할 수 없어서 중낙차 조건의 실험과 수차모델시험에 의한 낙차-출력 성능곡선 및 낙차-유량 성능곡선으로부터 주어진 정격출력 및 최대출력 시험영역에서의 보정된 출력과 효율을 이용하여 성능평가를 수행하였다. 현장시험에 의한 수차의 성능은 최소출력, 정격출



력, 최대출력 운전점에서 보증출력 및 보증효율을 만족시키는 결과를 나타냄을 확인하였다. 본 발전소에 적용된 튜블러 수차의 경우 대유량 저낙차 펄브터빈과 동일한 현상을 보이고 있으며, 수차의 회전수는 200rpm에 지나지 않으므로 캐비테이션의 발생은 없는 것으로 확인이 되었으며, 발전은 입구압력과 출구압력의 차이가  $0.06\text{kgf/cm}^2$ 이 되는 범위까지 가능함을 확인하였다. 또한 덩장의 영향으로 인하여 월간 발전소 운영 결과 조수간만의 차에 따른 발전소 가동율은 75% 정도에 이르고 있다. 모델테스트에 따른 발전소 최소 운영 지점은 0.75m 임을 고려할 때 수차의 성능 예측곡선은 거의 실제 운영과 거의 일치하는 것으로 예측되었다.

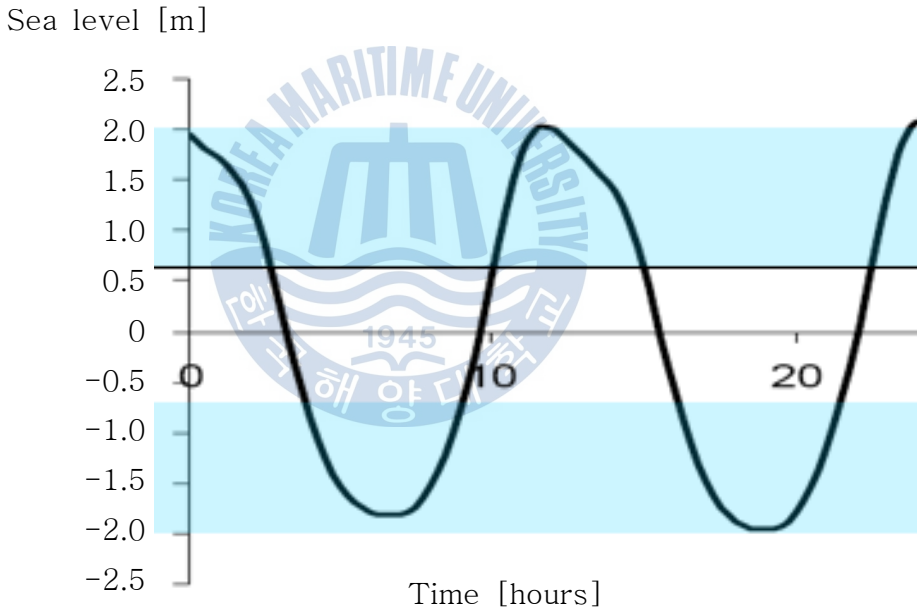


Fig.4.10 Typical sea water level profile at Jeju Haengwon-ri over a 24 hour period.(May, 2011)

### 4.3 수차의 고성능화

수차발전기를 해수에 사용하기 위해서는 해수에 대한 기본적인 검토사항은 물론이며 발전소의 지질학적인 특성, 어업 활동 등 지역주민들의 생활환경, 조수 간만의 차를 확인할 수 있는 현황자료등에 대하여 검토를 수행하여야 한다.

더불어 수차의 고성능화를 위해서는 다음과 같은 사항에 대해서 검토를 필요로 한다.

첫째, 주변 환경 여건의 개선

일반적인 양식장의 경우 방류수측으로 활어의 유입이 지속적으로 일어나고 있으며, 이로인하여 유입측 스크린에 부착되는 현상이 일어나고 있다. 이는 수차의 운영에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 확인하였다. 수차의 운전시 일정시간부터 수차 기동 정지시까지 발전량 감소의 현상이 나타났으며, 이러한 원인 조사를 위하여 잠수사를 투입하여 확인한 결과 광어의 스크린 부착현상으로 인하여 유입수량이 현저하게 줄어드는 현상이 발생하였다. 이는 양식장의 청소시점이나 기타 주기적인 활동에 기인하여 발생하였다. 이를 위해서는 스크린을 주기적으로 청소하거나 스크린에 부착된 이물질을 제거할 수 있는 설비를 확보하여 안정적인 수차 출력을 위한 조건을 확보하는 것이 필요하다.

그리고 최소한의 환경 훼손으로 개선작업이 가능하다면 덩장하부 혹은 일부 지점의 조건 개선을 통하여 간조시 배출구 측의 수위를 낮출 수 있도록 개선할 경우 발전량의 증대가 예상된다.

둘째, 소용돌이 현상 방지를 위한 장치의 필요

수차 유입부의 수류흐름을 고찰한 결과 상부 저수조의 수위가 낮아지게 되는 시점에서 소용돌이 현상이 발생하였다. 수차내부로 기체의 유입이 생기며 또한 이로인하여 유량의 유입량이 감소하게 되었다. 이는 곧 출력의 감소로 이어지므로 가능한 수위를 일정 수준 이상으로 유지하기를 요청하였으나 양식장의 운용을 위해서는 강제할 수 없는 사항이므로 필요시 유입구 측 해수면 아래측에 소용돌이 방지판을 설치하는 것을 제안하였다. 하지만 덩장이 제거될 경우 소용돌이는 발생하지 않을 것으로 예측되므로 덩장의 제거시에는 불필요 할 것으로 예상된다.

셋째, 가동보의 적절한 활용

수차실의 정기적인 점검이나 발전소의 운영상의 이유로 가동보를 설치하였으

며, 이를 적절히 이용하여 수차실의 안정적인 운영이 가능하다. 가동보의 적절한 활용을 통하여 유입구측 압력의 상승을 유도하여 출력의 향상을 기대할 수 있으나, 유입구측의 침수를 고려하여 적절한 범위에서 운영할 수 있어야 한다.

이상과 같은 추가적이 개선작업을 수행하게 될 경우 수차효율의 증대를 통해서 연간발전량에 있어서 가시적인 효과를 거둘 수 있을 뿐만 아니라 수차의 가동율을 100%로 정상화 할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 양식장의 배출수를 이용한 발전소를 건설함에 있어서 고려해야 할 사항뿐만 아니라 반드시 주변 환경영향평가를 수행하여 합리적인 설계 결과를 만들어 내어야 함을 보여주었다.



## 제5장 수도시설물을 이용한 중낙차용 튜블러 수차의 성능특성

### 5.1 중낙차용 튜블러 수차의 운전

현재 국내 100여개에 달하는 소수력 발전소내 수차를 병렬로 배열하여 유량을 배분하여 사용하고 있는 사례는 있으나 수차를 직렬로 연결하여 운영하고 있는 발전소는 아직 건설되지 않았다. Fig.5.1에 보이는 일본의 애가사키 발전소와 같은 경우 수차를 직렬로 연결하여 수차의 이용 범위를 넓힌 사례에 속한다. 본 연구에서도 동화정수장의 압력 분포 특성을 고려하여 직렬2대 설치에 따른 운전을 수행하였다. 현지 운영 조건을 면밀하게 조사한 결과 바이패스실 내부에 설치할 경우 정격유효낙차가 20m 이상 나타나고 있으나 바이패스실 상부에 위치할 경우 평균 유효낙차가 15m에 정도로 나타남을 확인하였다. 계절 강우량과 직접적인 연관성을 가지는 댐 출구 압력과 착수정 전단 압력을 고려하여 수차의 운전을 결정하였다. 현장 여건을 고려하여 수차의 설치는 2대를 수행하였으며 운전은 전단수차와 후단수차를 각각 나누어 수행하였다. 동화정수장의 경우 갈수기 평균 사용수량이  $1,000\text{m}^3/\text{hr}$  이하로 제한되어 있으므로 운영조건에 적합하 사용수량 범위에서 조건 변경을 수행하였다. 따라서 수차의 운전은 먼저 전단 밸브 개도 조절을 통하여 유입수량을 조절하였으며 이때 발생하는 압력의 변화에 따른 수차의 운전조건을 결정하였다. 1대 운전과 2대 동시 운전을 수행하였으며 추후 전단 수차를 제거하고 후단부 발전기와 부하장치를 이용하여 측정하였으며, 사용수량, 전단과 후단부의 압력, 회전수와 사용 부하량등을 운전자료로 수집하여 운전특성을 분석하였다. 튜블러 수차의 현장 설치 모습을 Fig.5.2에 보이고 있다.



Fig.5.1 View of tubular turbine arrangement in Japan





(a) Serial (25kW class  $\times$  2)



(b) Independence 50kW class  $\times$  1 set

Fig.5.2 View of tubular turbine arrangement for test site experiment



## 5.2 수차의 성능

### 1) 압력 분포특성

수차의 성능 측정을 위하여 압력의 측정위치를 Fig.5.3과 같이 결정하였으며, Fig.5.4에 수차 1대에 대한 압력분포 특성 곡선을 보이고 있다. 그림에 보이는 특성 곡선은 상업운전 조건인 계통연계를 대체하여 동기발전기에 30kW ~ 50kW 부하를 적용하여 러너 베인의 각도를 10도에서 20도까지 변경조건으로 하였다. 유량의 유입측으로부터 수차의 러너를 지나고 난 후 출구측 까지를 3단계로 구분하여  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{13}$  지점의 압력을 측정하였다. 그림에 보듯이 러너 베인의 개도가 커질수록 현저한 회전수의 저하와 압력의 저하가 발생함을 보이고 있다. 또한 출구 측에서는 방수구보다 위쪽에 설치한 수차의 특성상 측정지점의 압력이 대기압보다 낮은 현상을 보이고 있다. 튜블러 수차의 경우 흡출관을 통과하여 방류되는 지점이 수차의 중심보다 낮은 경우 압력을 측정할 경우 대기압보다 낮은 것으로 표시된다. 실제 이러한 압력의 차이는 수력발전기의 운전이 수행되는 동안 동력으로 작용하며, 향후 발전소의 설계과정에서 튜블러 수차의 장착 위치를 선정함에 있어서 중요한 요소로 작용할 것으로 예측된다.

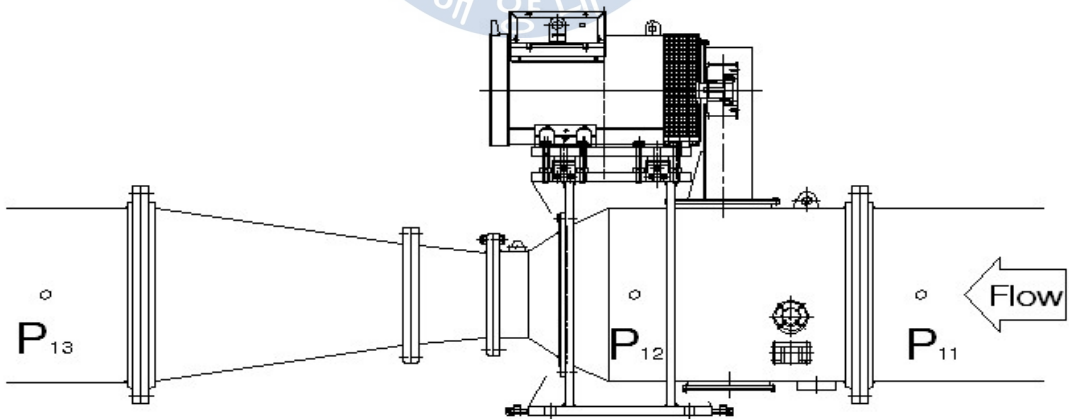


Fig.5.3 Schematic view of one tubular turbine arrangement for test site experiment

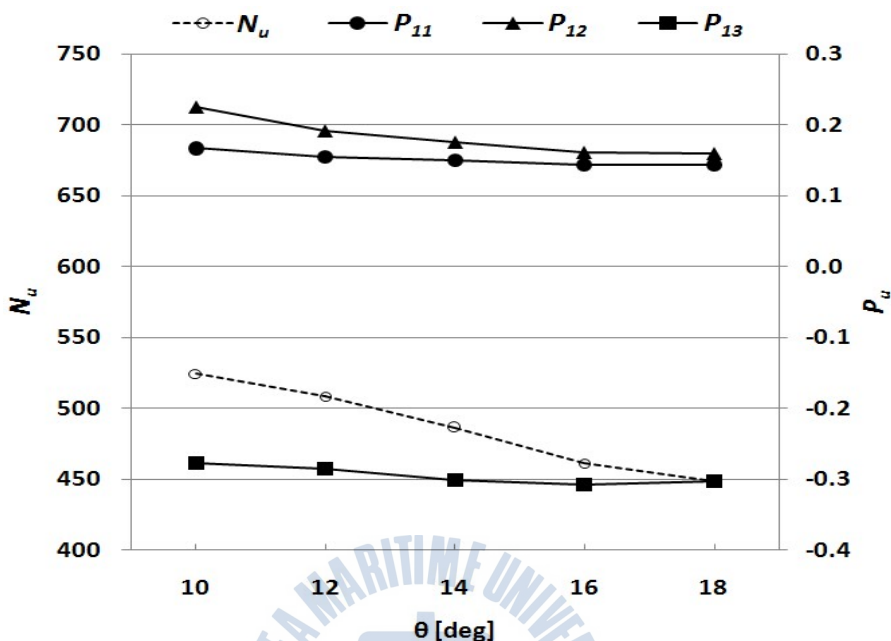


Fig.5.4 Performance characteristics curve by runner blade angle variation

## 2) 무구속 성능특성

수차 러너베인의 개도를 일정하게 하고 수차의 회전수를 상승시키면 출력과 효율은 점차 증가하다가 최대치를 지나면 점차 감소하기 시작하여 출력과 효율이 0이 되는 회전수가 존재한다. 이때는 에너지 생산의 기능을 상실한 채 기계적 손실만 발생하게 된다. 이러한 현상은 수차의 부하가 전혀 없어도 회전수가 무제한으로 상승하지 않음을 의미하고 이 상승한도를 무구속 속도라고 한다. 튜블러 수차의 경우 횡류 수차나 프란시스 수차와는 달리 가이드베인을 이용한 급폐쇄 시스템이 없기 때문에 이러한 무구속 속도특성을 파악할 필요가 있다. 튜블러 수차는 가이드베인을 이용한 급폐쇄가 불가능하므로 수차발전기의 성능으로 일정시간 동안의 한계점 운전이 가능해야 한다. 본 시험에 사용된 튜블러 수차는 정격 회전속도의 2.3배까지 견딜 수 있는 구조로 설계를 진행하였으며, 최대 무구속 속도는 정격의 1.9배까지 상승하였다. 또한 본 시험에 사용된 튜블러 수차는 Fig.5.5에서 보이는 것과 같은 속도특성을 가지고 있는 것으로 확인하였다. 시험을 수행하기 위하여 정수장의 운

영조건에 지장을 초래하지 않는 범위내에서 결정하였으며, 무구속 운전은 각 개도별로 5분씩으로 제한하였다. 시험결과 개도를 증가시킬수록 유량은 증가하지만 회전수를 현저하게 줄어드는 특성을 보이고 있다.

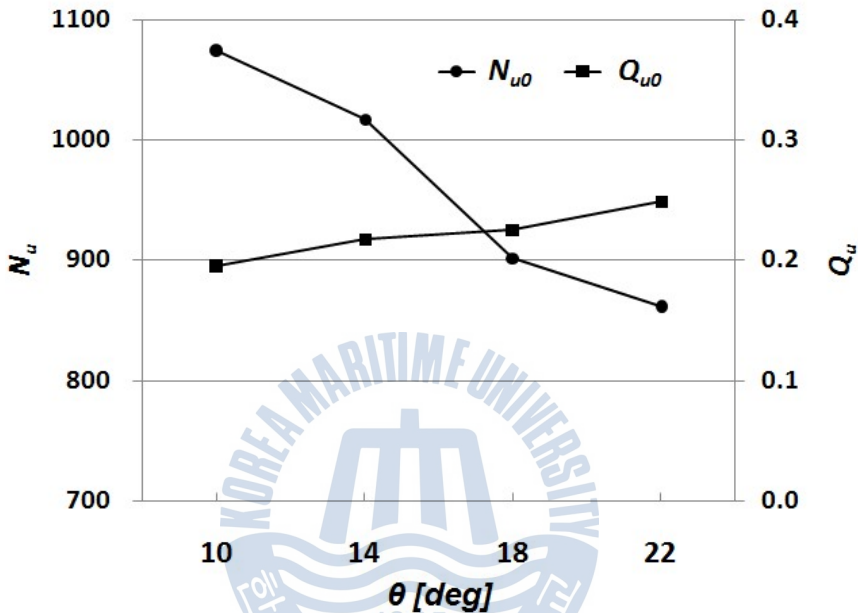
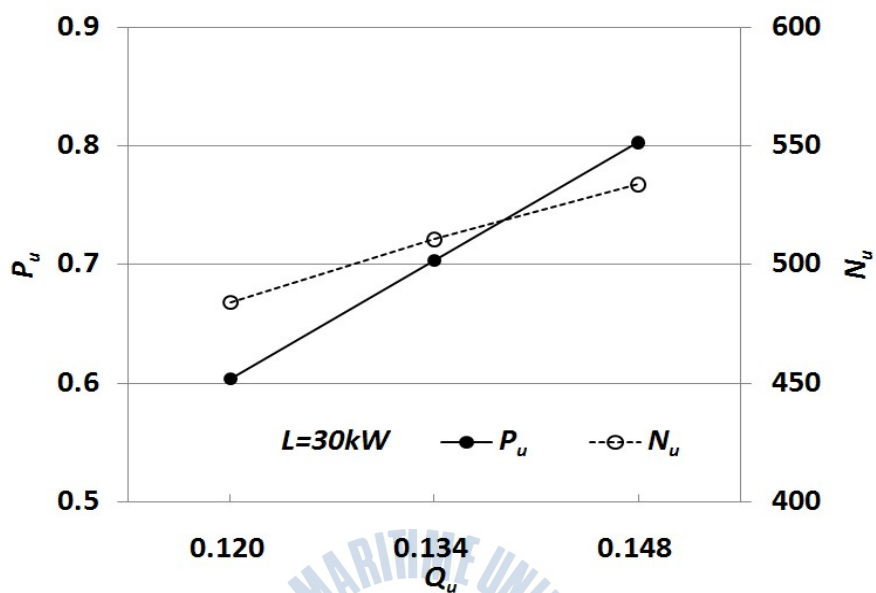


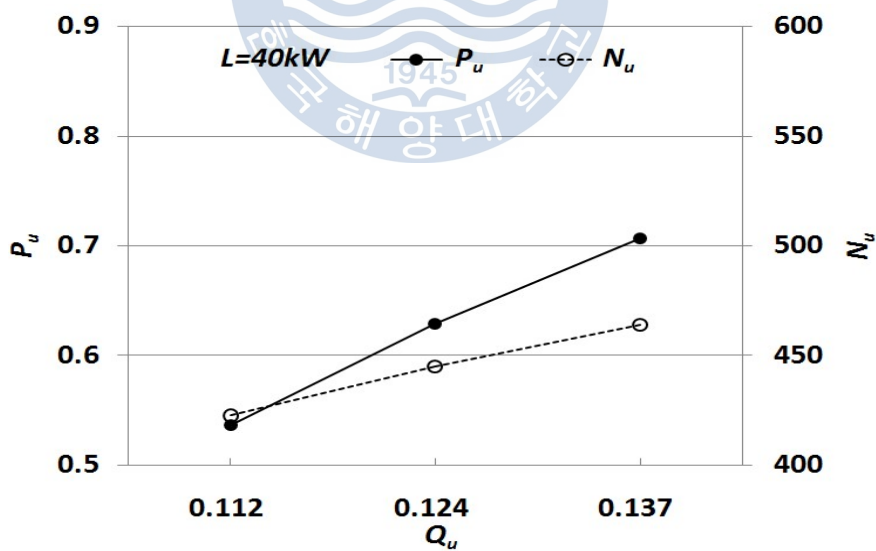
Fig.5.5 Characteristic curve by run away speed

### 3) 유량변화에 따른 성능특성

Fig.5.6에 보이는 성능곡선은 수차 러너베인의 개도를 일정하게 고정시키고 유량조건을 변화시켰을 경우의 수차발전기 성능특성을 나타내고 있다. 성능곡선에 보이듯이 단위유량의 증가에 따른 단위출력, 단위회전수의 증가 및 추세를 알 수 있다. 시험결과 유량이 증가하면 출력 및 회전수가 증가하는 특성을 보이는데, 동일한 유량에서는 부하의 양에 비례하여 변동을 보임을 알 수 있다. 실제로 이러한 현상은 수차발전기를 계통에 연결하였을 경우에는 부하의 영향이 사라지게 되므로 하나의 곡선으로 동일하게 나타날 것으로 예측된다. 또한 유량과 출력의 증가 비율이 일정하게 나타나지 않는 것은 유량의 변동에 따라서 수차발전기 입구측의 압력이 변하기 때문이다. 측정에 의한 값을 비교해 보면 유량의 증가에 대하여 압력의 감소가 나타난다.

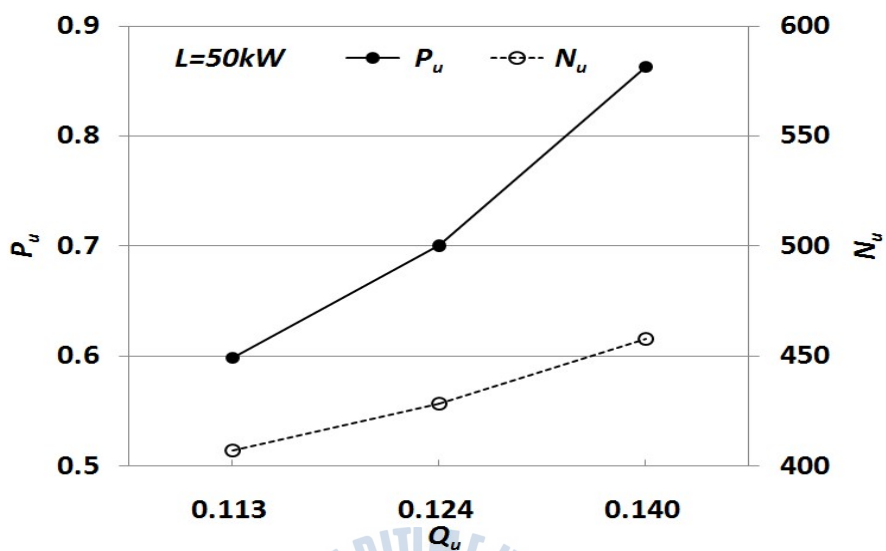


(a)  $L = 30kW$

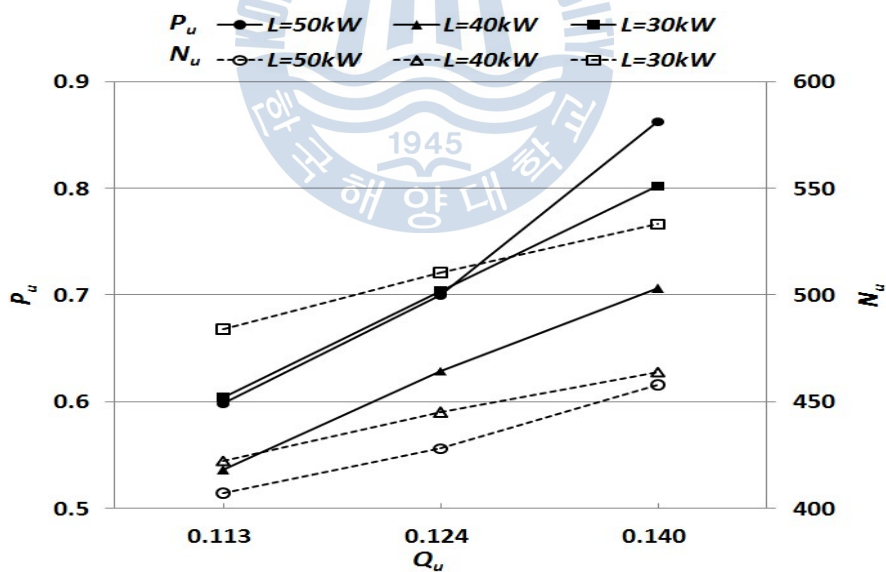


(b)  $L = 40kW$

Fig.5.6 Performance characteristics curve by flowrate variation  
(continued)



(c)  $L = 50kW$



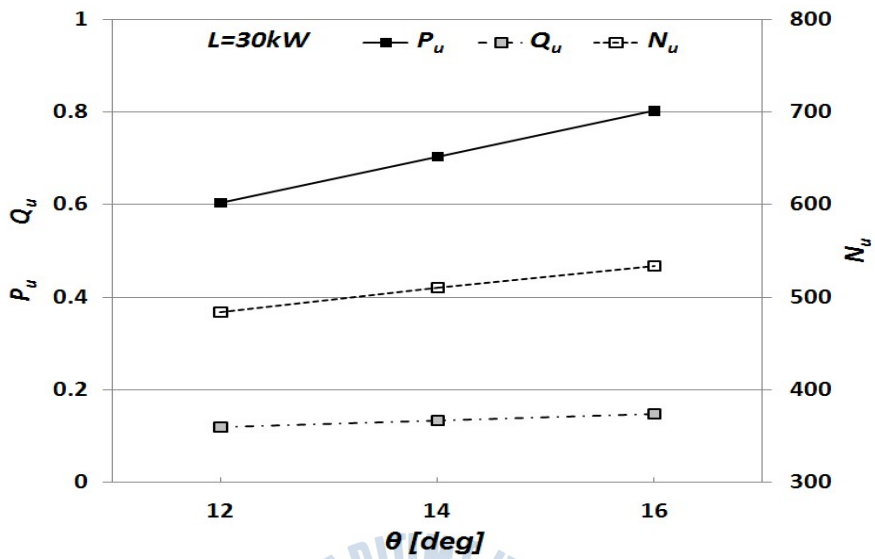
(d) Load variation

Fig.5.6 Performance characteristics curve by flowrate variation

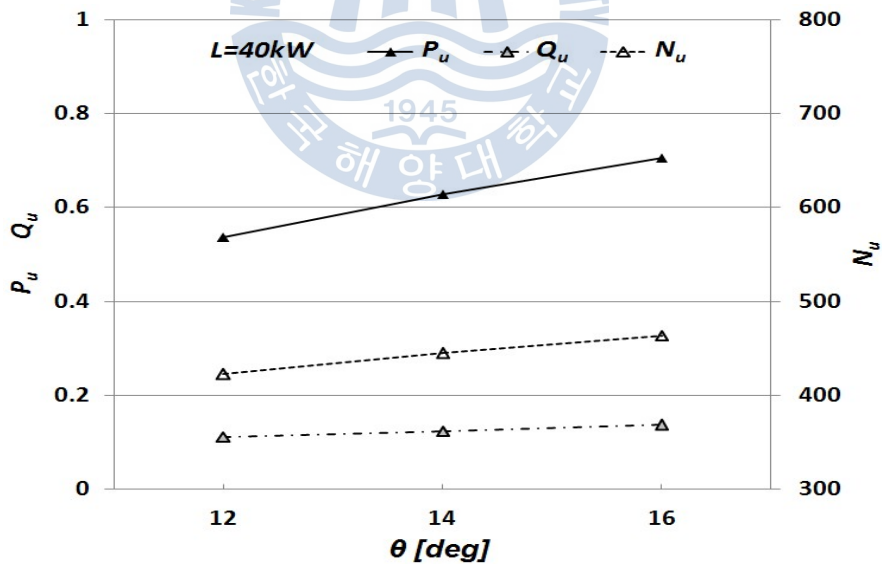
#### 4) 러너베인 개도 변화에 따른 성능특성

Fig.5.7에서는 유량, 낙차 등의 외부조건을 동일하게 유지한 상태에서 수차발전기 러너베인의 개도를 변경시킬 경우 수차발전기의 효율특성을 나타내고 있다. 표에서 보이는 바와 같이 러너베인의 개도를 줄이면 회전수 및 출력은 증가하고 유량값은 감소함을 알 수 있다. 효율은 점차 증가하는 추세를 보이다 일정한 개도 이하에서는 감소하는 데, 이는 캐비테이션 발생등의 이유로 효율이 감소하는 현상을 보이는 것이다. 수차발전기의 보호를 위해서는 정격의 개도에서 사용하는 것이 최고의 효율을 얻을 수 있음을 보이고 있다.





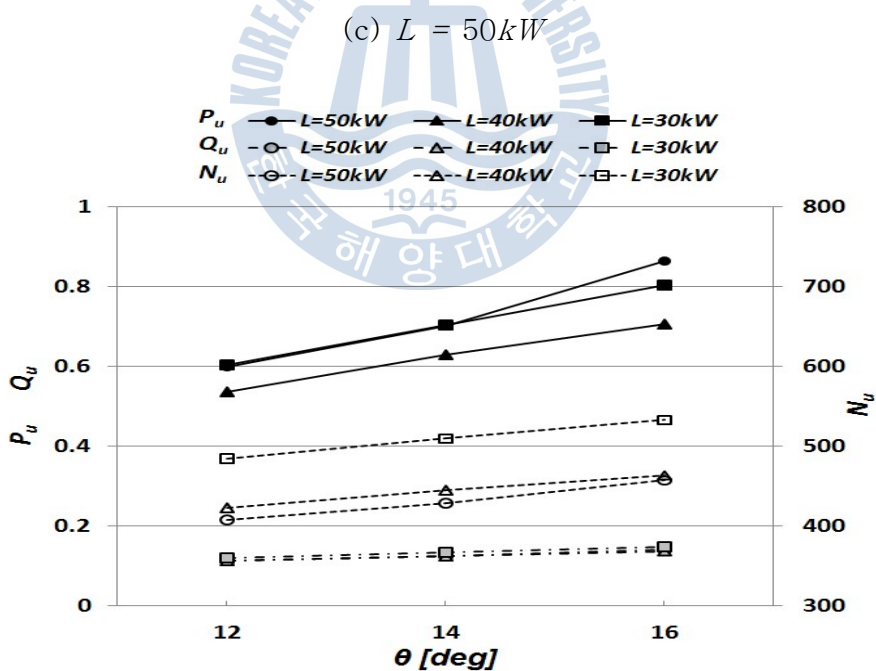
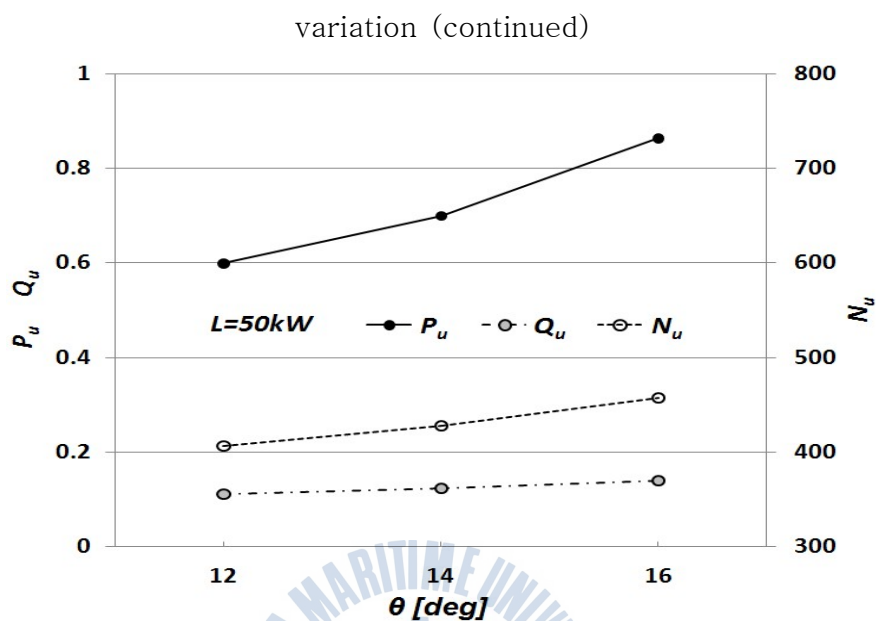
(a)  $L = 30kW$



(b)  $L = 40kW$

Fig.5.7 Performance characteristics curve by runner blade angle





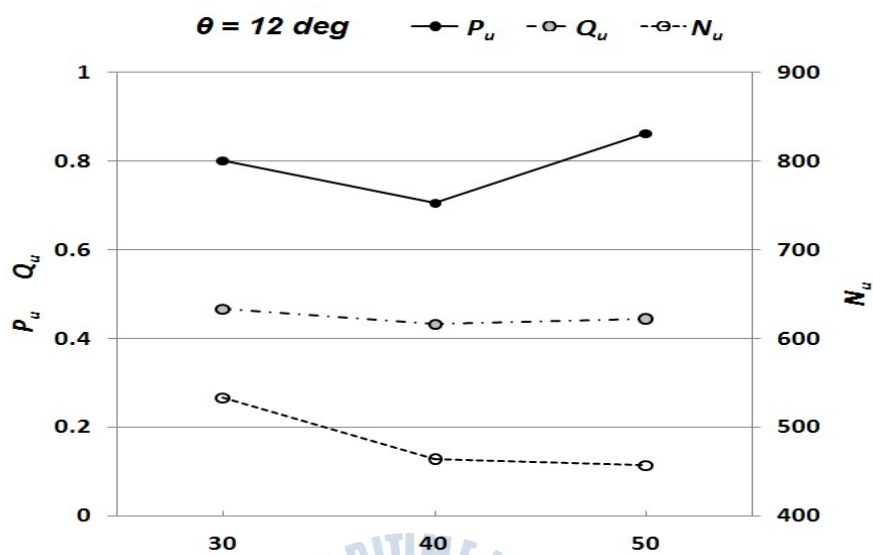
(d) runner blade angle variation

Fig.5.7 Performance characteristics curve by runner blade angle variation

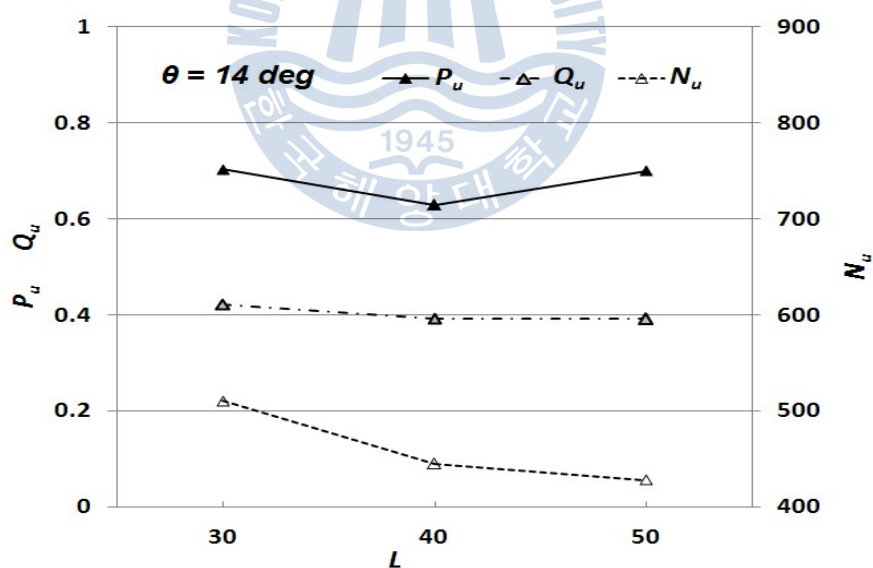
##### 5) 부하량의 변화에 따른 성능특성

소수력용 수차발전기는 일반적으로 소용량의 발전일 경우 발전소 내부 공급 전원으로 사용하거나 전력회사의 계통에 연결하여 발생된 전력을 판매하게 된다. 하지만 본 시험에서는 부하장치를 이용하고, 전력계통에 연결하지 않으므로 부하량의 변화에 따라서 수차발전기의 운전환경에 변화를 가져오게 된다. 이는 수차발전기의 특성을 파악함에 있어서 저해 요인이 되기도 한다. Fig.5.8에 보이는 특성표는 50kW급 발전기에 실제로 30kW, 40kW, 50kW의 부하를 각각 적용하여 동일 조건에서 운전을 한 결과이다. 수차는 12도의 개도에서는 50kW 부하일 때 최고의 발전량을 나타내었으며, 16도에서는 30kW와 50kW에서 거의 동일한 발전량을 보이고 있다. 특성표에서 보이는 바와같이 26kW의 출력을 가지는 수차발전기에 높은 부하보다는 출력값에 비례하는 부하를 적용하는 것이 수차발전기의 효율을 높게 유지할 수 있었다.



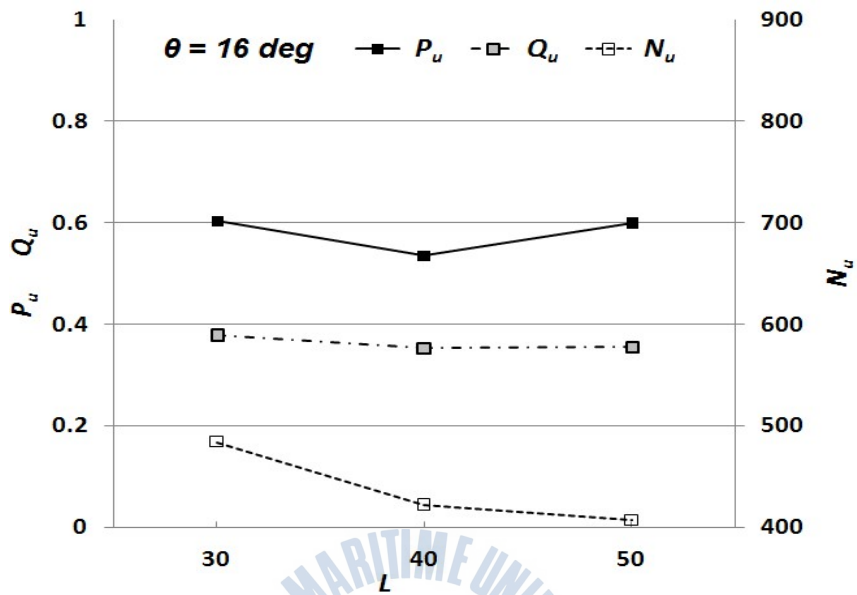


(a)  $\theta = 12 \text{ deg}$

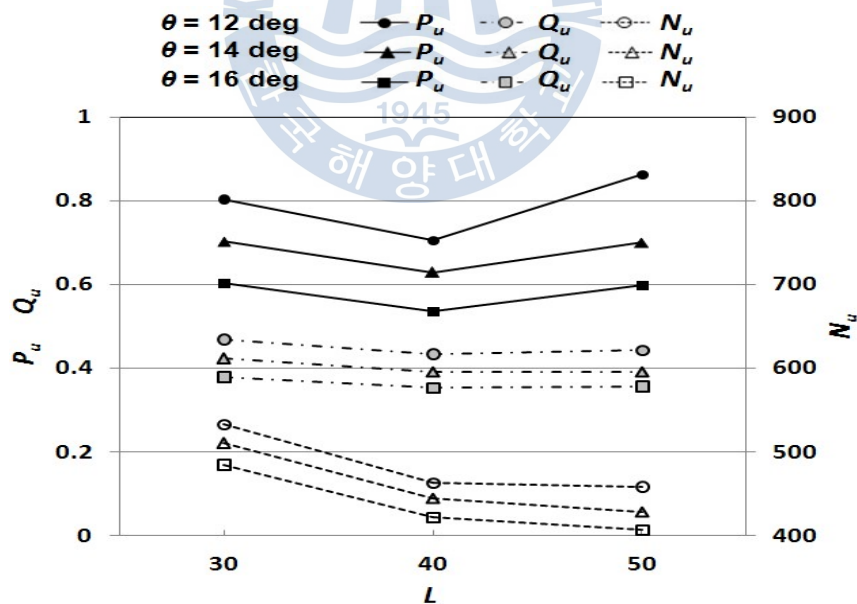


(b)  $\theta = 14 \text{ deg}$

Fig.5.8 Performance characteristics curve by electrical load variation  
(continued)



(c)  $\theta = 16 \text{ deg}$



(d) electrical load variation

Fig.5.8 Performance characteristics curve by electrical load variation

## 6) 2대 직렬연결에 따른 성능특성

Fig.5.9에서는 앞에서 언급한 바와는 달리 유효수두값이 수차발전기의 설계 값보다 높을 경우 동일한 형식으로 운전하기 위한 방법에 대한 특성시험 값을 보이고 있다. 댐 수위의 상승으로 정수장의 배관내 압력값이  $2.0\text{kg/m}^3$  이상을 보이므로 수차발전기를 직렬 2대 연결을 하였다. 러너베인의 변경 범위를 10에서 26도까지로 결정한 뒤 출력값과 유량, 회전수의 변화를 전단수차와 후단수차로 나누어서 시험하였다. A를 유량의 유입이 일어나는 쪽인 전단수차 값으로 하고 B를 후단수차로 하였을 때 두 수차의 성능을 비교해 보이고 있다. 특성 표에서는 전단(A)수차보다는 후단(B)수차의 효율이 조금 더 높게 나타나고 있다. 이는 전단수차에선 정류를 거친 흐름을 후단수차에서 발전으로 사용하기 때문에 효율면에서 높게 나타나고 있음을 보이고 있다. 또한 직접적인 발전량을 측정한 결과 후단수차의 출력이 높게 나타나고 있다. Fig.5.10은 1대 독립 운전시 효율과 2대 직렬 운전시 효율을 상대적으로 비교 분석한 결과를 보이고 있다. 사용지점의 특성과 여건을 고려하여 최적의 수차를 선정하는 것이 중요한 요소이기도 하지만 본 정수 시설물이 위치한 지역의 특성과 같이 유량과 압력의 변동이 심한 경우에는 수차의 적절한 배치를 통하여 효과적인 에너지의 회수가 이루어져야 한다. 그럼에서 보이는 특성곡선에서는 기기적인 손실을 고려해야 하므로 배분하여 출력을 얻는 시스템 보다는 독립적으로 에너지를 회수하는 편이 효율적임을 보이고 있다.

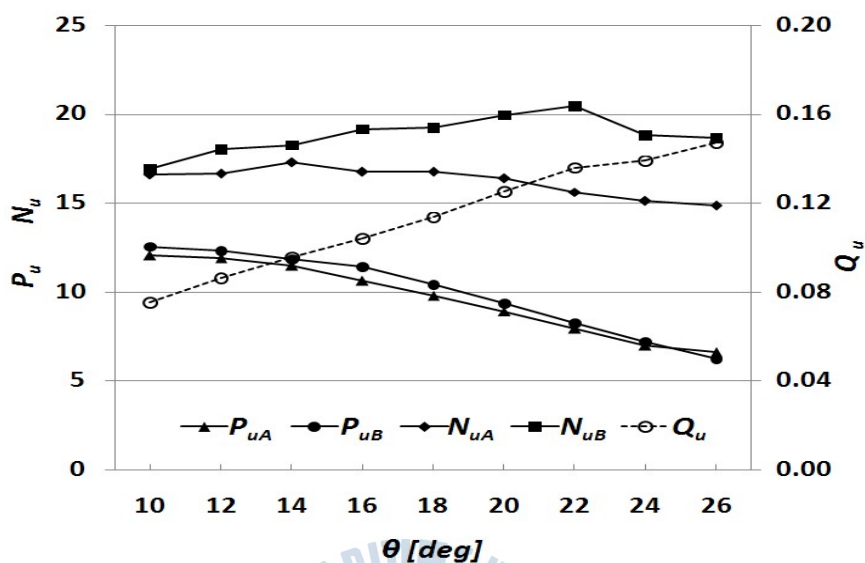


Fig.5.9 Performance characteristics curve by parallel arrangement

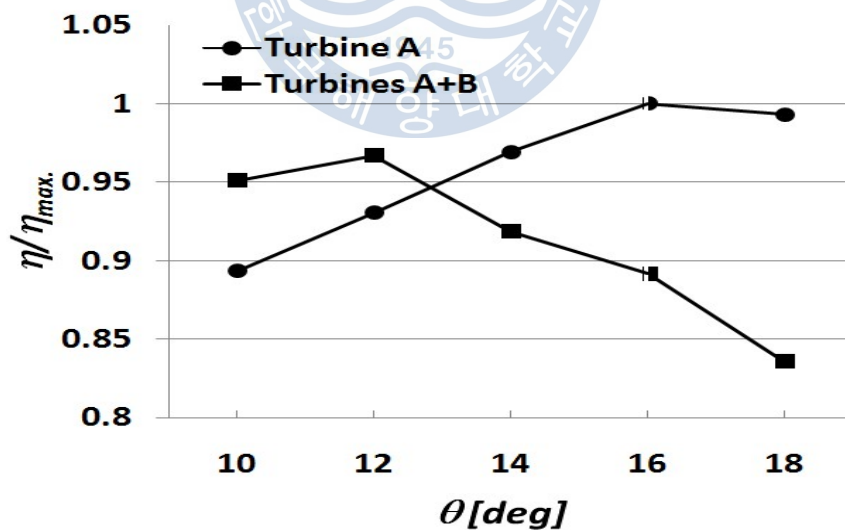


Fig.5.10 Performance characteristics curve compare with turbine arrangement

### 5.3 수차의 고성능화

정수장의 운영조건을 토대로 설계를 수행한 수차를 설치하여 운전을 수행한 결과 압력의 변동량이 심하게 나타났다. 따라서 베인 4매 적용하였던 설계를 변경하여 베인 5매로 변경하였다. 5매로 변경하여 수차의 안정을 유도하여 안정적인 발전이 가능할 것으로 예측된다.

#### ① 설계유량

$$Q = 0.47m^3/s, \quad H = 16m$$

$$Q_{des} = Q$$

수두가 10m이상 이므로 날개는 5매로 선정한다.

#### ② 날개 지름의 선정

$$n_{11} = 150rpm, \quad \varphi = 20.5^\circ, \quad Q_{11} = 1550l/s$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{470}{1550 \times \sqrt{16}}} = 0.2753m$$

$$D_1 = 0.2804m$$

$$D_{1P} = 0.280m$$

$$D_{4P} = 0.275m$$

#### ③ 날개 회전수의 선정

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 150 \times \frac{\sqrt{16}}{0.275} \simeq 2181.8rpm$$

$$n_P = 2180rpm$$

$$n_d = n \times 2.3 = 5014rpm$$

$$n_{11P} = \frac{n_P \times D_{4P}}{\sqrt{H}} = \frac{2180 \times 0.275}{\sqrt{16}} = 149.9rpm \rightarrow OK$$

$$Q_{11(des)} = \frac{Q}{D_{4P}^2 \times \sqrt{H}} = \frac{470}{0.275^2 \times \sqrt{16}} = 1553.7 l/s \rightarrow OK$$

#### ④ 날개 각도의 선정

$$n_{11P}, \quad Q_{11(des)} \rightarrow \phi = 20.5^\circ$$

$$\phi_P = 20^\circ$$

#### ⑤ 예상출력



- 수차 예상 출력

날개 각도  $\varphi = 20^\circ$ , 수차효율  $\eta_t = 75\%$ ,

$$P = 9.8 \times 0.46 \times 16 \times 0.75 = 55.3 kW$$

- 발전기 - 4극 유도발전기

$$\eta_g = 91\%$$

$$P_g = 50 kW$$

- 종합 발전량

$$\eta = \eta_t \times \eta_g = 0.75 \times 0.91 = 68.25\%$$

$$P = 9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g = 9.8 \times 0.47 \times 16 \times 0.75 \times 0.91 = 50.3 kW$$



## 제6장 폐수처리장배출수를 이용한 고낙차용 튜블러 수차의 성능특성

### 6.1 고낙차용 튜블러 수차의 운전

폐수처리장의 방류수를 이용한 발전설비 구축은 기존 설치된 개수로를 두고 신규로 압력관로를 구성하여 1차분 발전설비 2기 설치 및 2차분 1기 설치의 단계로 수행되었으며, 향후 물량 확보가 완료되었을 경우 가동을 위한 조기 설치의 단계로 수행하였다. 폐수처리장의 경우 년중 무휴 운전을 기본으로 운영되므로 안정적인 물량공급 및 낙차의 확보가 가능하였다. 설계완료 및 제작과정을 거치고 Fig.6.1과 같이 현장 설치를 완료하였다. 수차의 운전조건을 확인하여 위하여 수차의 전단에 설치한 압력계와 후단부 압력계의 값을 비교하여 발전에 사용된 유효낙차를 산정하였으며, 현지 운영여건상 유량계는 필요치 않으므로 유량데이터는 확보할 수 없는 사항이었다. 따라서 수차의 운전특성 파악을 위하여 Fig.6.2와 같이 유속-면적법(velocity-area method)을 이용하여 발전사용 수량을 산정하였다. 측정결과 Table 6.1에 보이는 것과 같이 평균 사용유량은  $0.785\text{m}^3/\text{sec}$ 로 나타났다.

유량 측정은 1기 운전을 통하여 각각의 유량에 대한 자료를 측정하여 계산하였으며, 개별 운전시 유량값의 편차는 거의 없었다. 본 수차의 발생전력은 전기안전공사의 승인을 득한 계전기를 통하여 확인하였다. 수차의 발전에 사용된 유효낙차는 압력계측기를 통하여 확인할 결과 18.5m에 이르는 것으로 나타났으며, 이는 실제 수차발전기의 설계시 적용되었던 16.5m 대비 약 2m 이상 높은 것으로 나타났다. 실제 설계단계의 계측치와 발전소 건설 후 배관내 압력을 이용한 차이가 발생하는 이유는 초기 설계시의 측정, 계산오차에 기인하는 것으로 판단된다. 수차 운전결과 출력이나 운전의 안전성등에 전혀 문제가 없는 것으로 판단되었다.



Fig.6.1 View of power hydraulic power plant in wastewater treatment plant

Table 6.1 Calculated flow rate by measured flow velocity

| 측정자료           | A지점                       | B 지점                      |
|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 수로폭            | 1,225mm                   | 1,220mm                   |
| 발전수 수로상의 수면 높이 | 360mm                     | 360mm                     |
| 측정 유속          | 1.0                       | 0.8                       |
| 유량환산 값(유속×단면적) | 1,508.2 m <sup>3</sup> /h | 1,317.6 m <sup>3</sup> /h |
| 평균유량           | 0.785 m <sup>3</sup> /sec |                           |

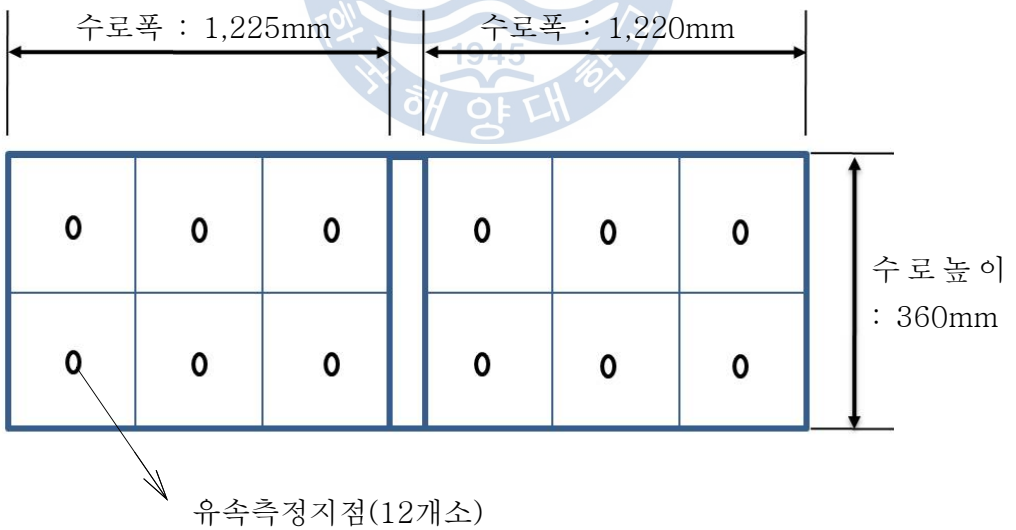


Fig.6.2 Measuring flow rate using velocity-area method

## 6.2 수차의 성능

본 연구의 대상인 폐수처리장내 설치된 수차발전기는 3개의 병렬연결 운전 조건으로 설계 되었으며, 현재는 2기의 수차발전기가 설치되어 운전되고 있다.

### 1) 수차의 연속운전

LCD 폐수처리장의 1호기와 2호기 수차의 성능확인을 위하여 안정적인 운전이 가능한 시간을 선정하여 5시간 연속 운전을 수행하였다. 그 결과 Fig.6.3에 보이는 것과 같이 유량의 변동이 약 10% 범위에서 일어나고 있으며, 출력의 변화 역시 유량변동에 대응하여 변화가 있음을 예측하였다.

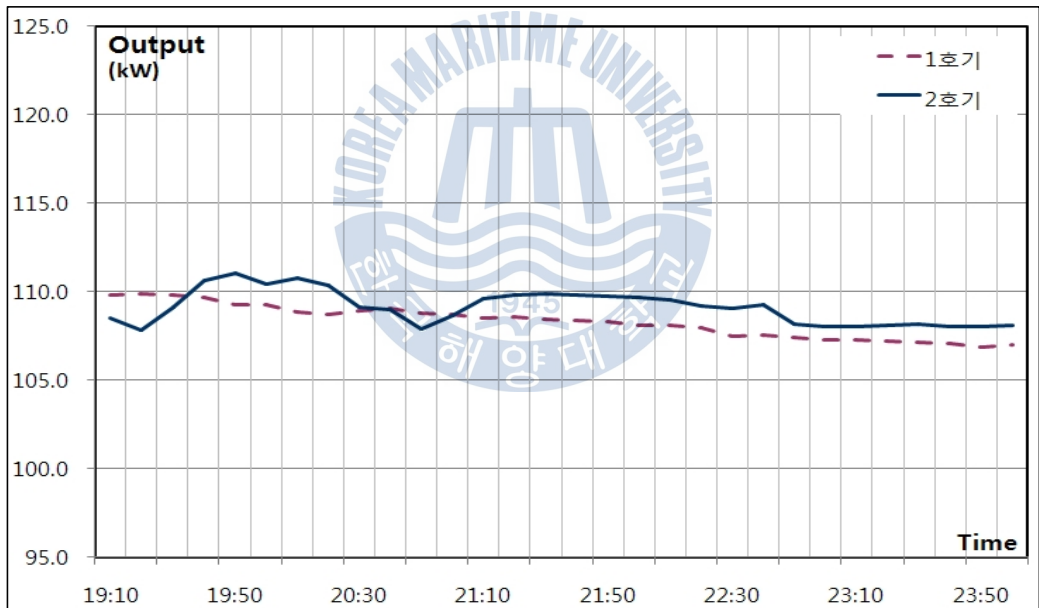


Fig.6.3 Performance curve in wastewater treatment plant

폐수처리장의 방류가 평균적으로 안정적인 유량을 공급하고 있으나 시간별로 유량의 편차는 존재하는 것으로 확인하였으며, 이러한 여건에 대해서는 러너 베인의 개도 조절 범위에 대한 제어 기능을 더욱 세분화해야 할 필요성이 있음을 확인하였다. 그림에 보이는 1호기와 2호기의 출력 특성의 차이는 출력 측 수류의 흐름방향에 대한 간섭으로 인하여 흡출관측에 잔류압이 발생하여

수차측 수류의 원활한 배출을 방해하고 있음을 확인하였다. 이러한 배출구측의 불안정으로 출력의 변동과 저하가 발생하는 것으로 예측되었다. 현지 폐수처리장의 운전조건과 상부 유입구측 건설공사가 끝나는 시점에 정상적인 운전이 수행되고 수류의 흐름이 안정 될 경우 해소될 것으로 예측된다.

## 2) 부하차단시험

더불어 비상정지 시 발생 가능한 무구속 운전에 대한 안정성 검사를 위하여 Fig.6.4와 Fig.6.5과 같이 부하차단시험을 수행하였다. 수행결과 모두 정상 합격으로 처리되었으며, 발전사업 수행에 전혀 문제가 없음을 확인하였다.

수차 전단부에 설치된 압력측정 계기와 후단부의 압력 측정 계기로부터 배관내 압력값을 측정한 결과 전단부는  $1.95 \text{ kgf/cm}^2$ , 후단부는  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 을 보였다. 설계상의 손실수두를 감안한 유효낙차는 16.5m 이었으나 측정오차와 배관내 정체압의 발생으로 인하여 측정된 압력은  $1.85 \text{ kgf/cm}^2$  으로 나타났다.

이를 근거로 발전기의 효율은 공급처에서 실험을 통하여 제시한 93%를 이용하여 수차의 효율을 계산하면 다음과 같다.

$$\eta_t = \frac{P}{9.8 \times Q \times H \times \eta_g} = \frac{110}{9.8 \times 0.785 \times 18.5 \times 0.93} = 0.83$$

폐수처리장의 방류수에 적용된 튜블러 수차의 효율은 83%에 이르는 것으로 확인이 되었으며, 정격 설계값에 해당하는 운전조건이 만족되면 수차의 효율은 2%이상 높게 나타날 것으로 예측되었다. Fig.6.6에서는 설계시 예측되었던 유효낙차에 대한 출력값을 나타내고 있다.



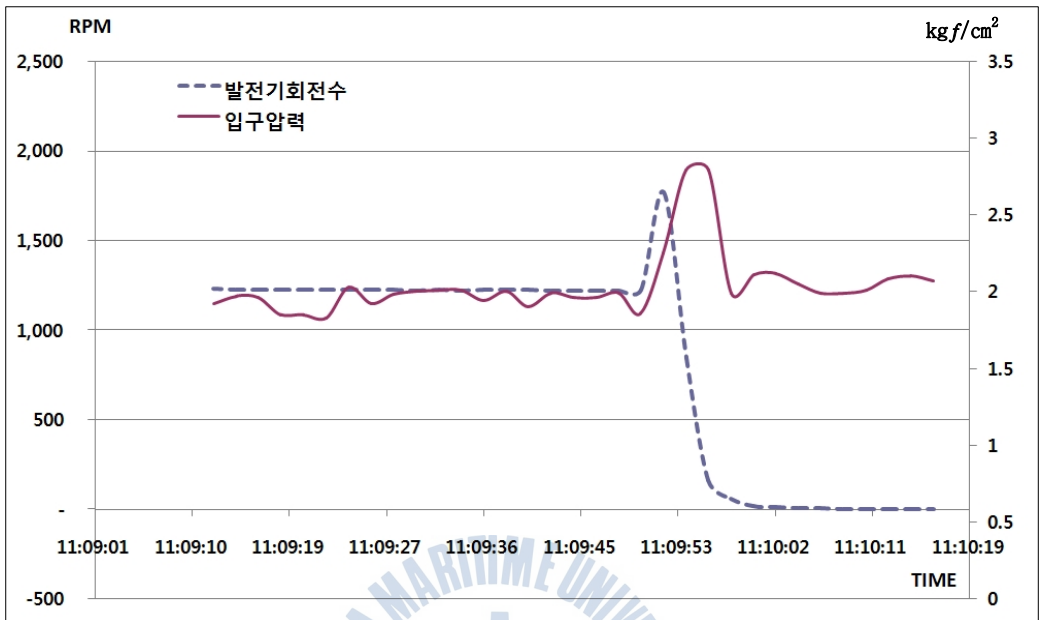


Fig.6.4 Characteristic curve by run away speed in 1st turbine

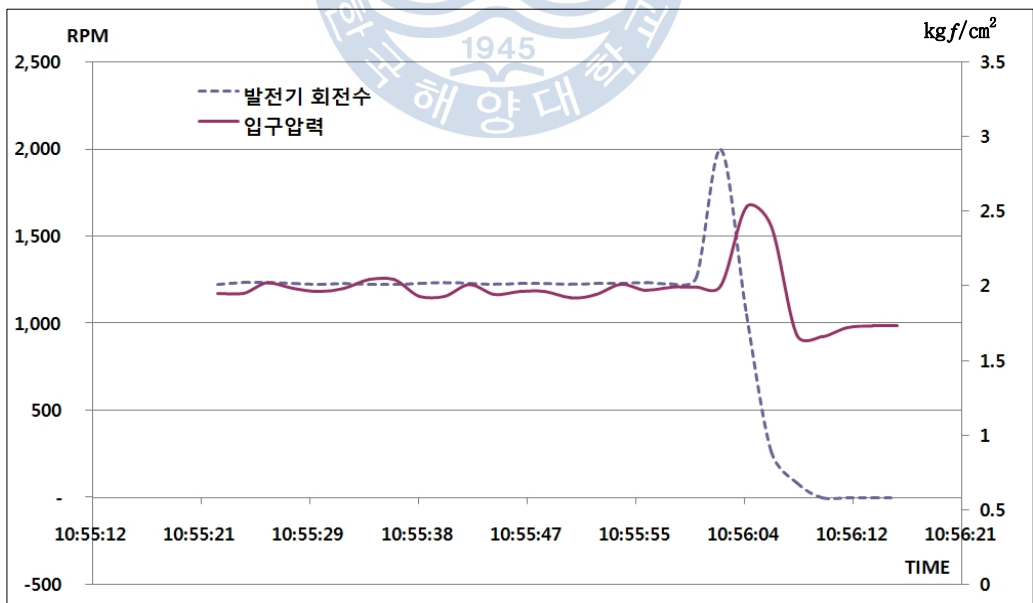
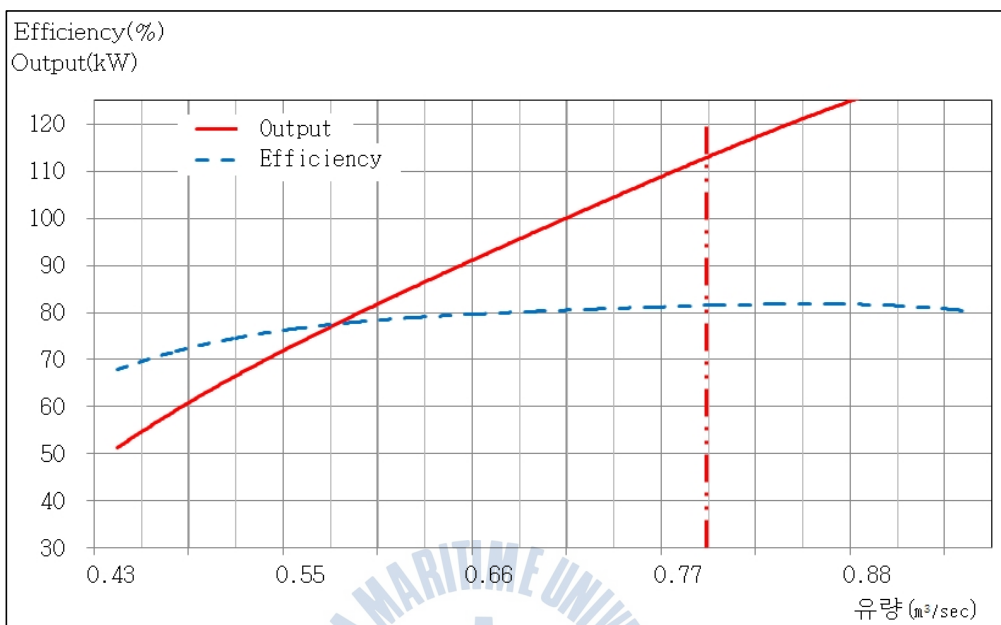
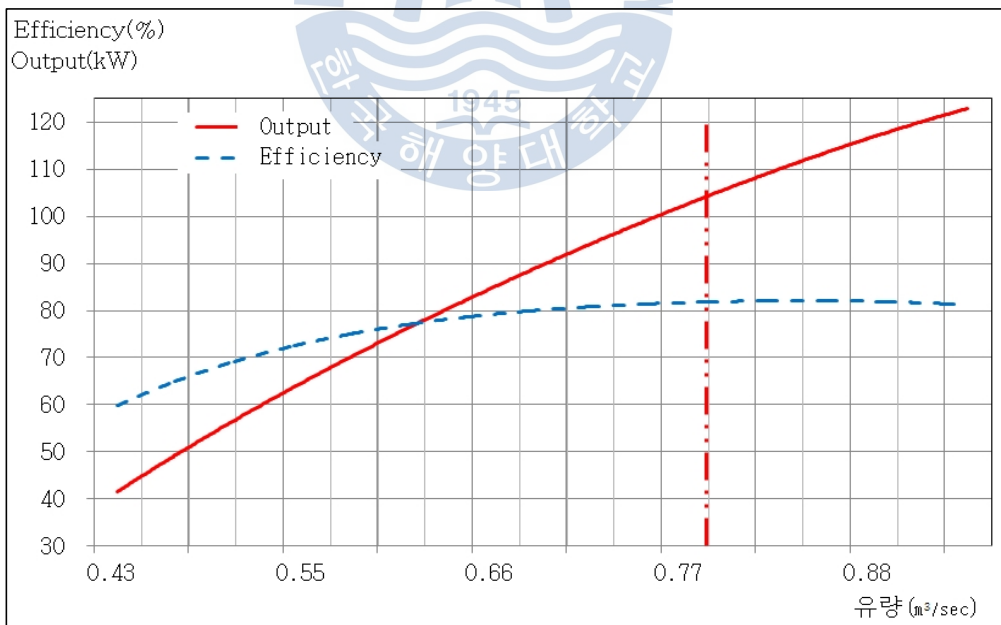


Fig.6.5 Characteristic curve by run away speed in 2nd turbine





(a) 16.5m head



(b) 18.5m head

Fig.6.6 Characteristic curve by design specification

### 3.3 수차의 고성능화

수차시스템의 설치와 시운전 및 성능평가를 통해서 수차의 최대가용 범위가 20m에서 전혀 문제가 없음을 확인하였다. 하지만 수차의 성능향상 조건으로 흡출관측의 설계 보완을 통하여 수류의 원활한 흐름을 유도할 수 있도록 구성해야 할 것으로 예측된다. 3차분 추가 설치가 완료되고 방수량의 증가가 이루어지면 유입수와 방류수의 흐름을 분석하여 대책을 강구하는 것이 합당할 것으로 예측된다. 특히, 소용돌이 현상이나 방류에 방해가 되는 흐름이 있는지를 확인해야 할 것으로 판단된다. 특히 3기의 수차를 동시에 운영할 경우 방수구측 튜브의 길이가 동일한 관계로 배출수의 유동에 저항이 발생하여 수차의 운전에 방해가 될 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위하여 Fig.6.7과 같이 배출구측 배관의 길이를 연장하는 것이 효율적일 것으로 보이며, 상부를 향하여 파이프의 단면적을 크게 하여 배출수 수류의 압력이 수면을 향하도록 개선할 필요성이 있다.

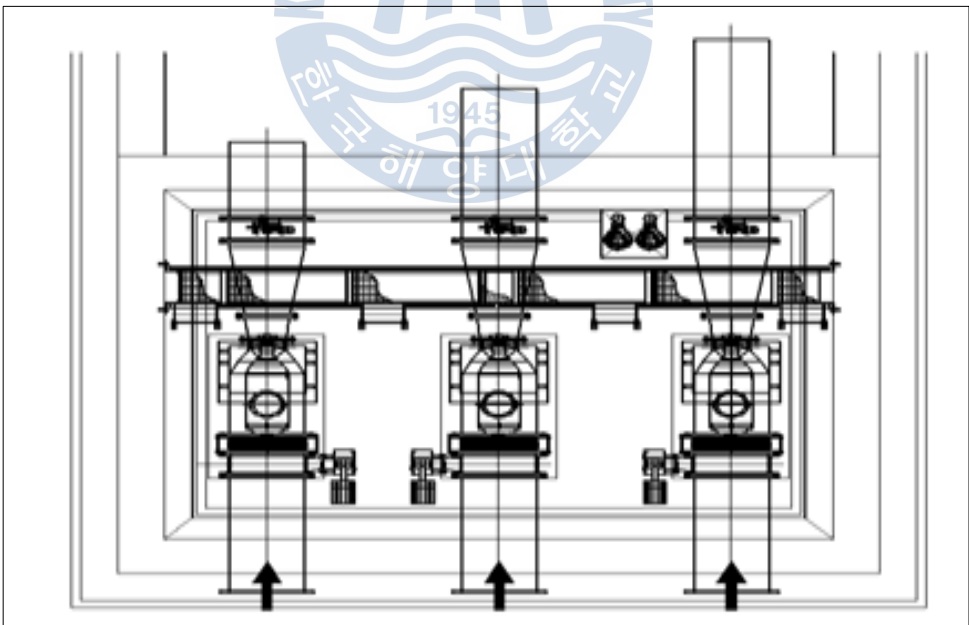


Fig.6.7 View of power hydraulic power plant in wastewater treatment plant

## 제7장 튜블러 수차의 현장 최적화

기존 모델실험과 현장 실증실험 및 CFD 분석을 통하여 주요 구성요소에 대한 최적설계 및 성능향상을 위한 구조적인 취약점을 보완하여 현장 설치를 완료하였다. 하지만 컴퓨터 수치해석이나 모형실험등의 과정에서 적용한 최적화에 운영상의 문제점을 고려한 최적의 조건을 만족시키는 것이 필요하다. 본 연구에서는 실험과 분석을 통하여 최적화된 튜블러 수차를 현장에 적용하였으며 현장 운영조건에 맞추어 운영을 수행하였다. 5개의 대표 형상으로 표준화를 수행하였으나, 설계에 따라서 제작 및 설치된 발전 시스템과의 현장최적화를 고려해야 함을 확인하였다. 앞장에서 설명한 고성능화의 최종단계로서 다음과 같이 현장최적화를 위한 조건 검토를 수행하였다.

### 1) 저낙차 조건에 있어서 수차 배치에 관한 문제

양식장 방류수를 이용한 수차발전시스템의 구축에 있어서 운영중 발전용수의 유입이 원활하게 이루어지지 못하는 현상이 발생하였다. 특히 이미 언급한 바와 같이 양식장에서 흘러나온 이물질의 스크린 부착현상과 별도로 해수면의 변화에 따라서 유입수량의 변동이 발생하며, 일정 구간에서 유입구측에 Fig.7.1 과 같이 소용돌이 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 유입구측의 지형적인 원인에 기인하는 것으로 판단되는 이러한 현상에 대하여 초기 토목 굴착 및 건축물 설계시 사전에 고려되어 유입구 단판과 스크린의 설치 시 설계에 적용하는 것이 효율적인 것으로 예측된다.



Fig.7.1 View of vortex in inlet

특히 선진 사례에 있어서는 이러한 소용돌이에 대하여 Fig.7.2와 같이 차단관을 설치하는 등의 대응책이 적용된 사례가 조사되었으며, 양식장 방류수를 이용한 저낙차용 튜블러 수차를 적용한 소수력 발전소에 적용해도 무방함을 확인하였다.

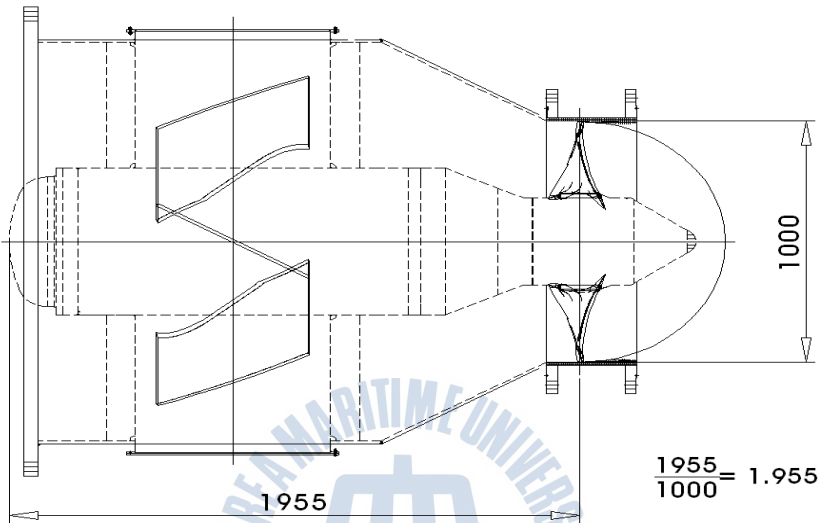


Fig.7.2 Installation of vortex plate in hydro turbine

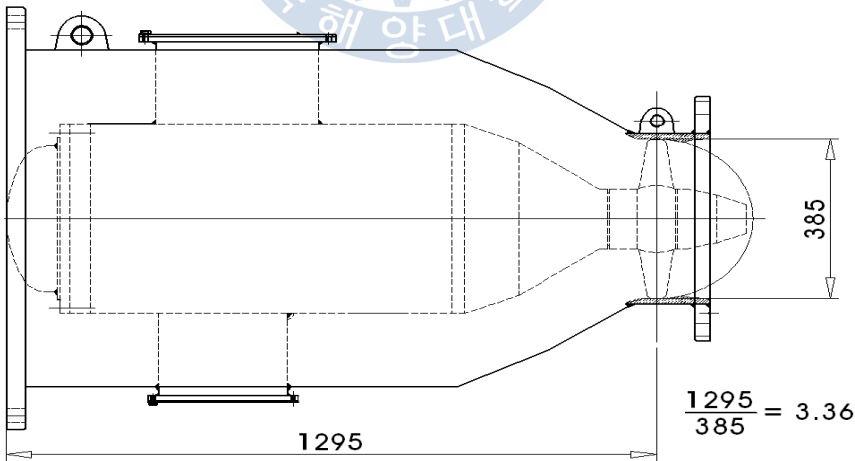
## 2) 수차의 형상 선정과 발전소의 구성

소수력발전소의 건설에 있어서 가장 중요한 소수력발전시설의 경제성 분석에서 기계류가 차지하는 비중보다는 토목 건축이 차지하는 비중이 크게 나타나는 경우가 많다. 이러한 사례에 있어서 소수력용 터빈의 크기가 건축물이나 주변 시설물의 크기를 결정하는 경우가 많으므로 터빈의 크기를 최소화 하는 경향이 있다. 실제 본 연구에서도 초기에 설치한 저낙차용에 비하여 고낙차용 터빈에 적용된 날개측의 지름과 길이방향 날개 중심에서 유입측 커버까지의 길이를 비율로 표시하면 Fig.7.3에 보이는 바와 같이 길이가 상대적으로 길어 졌음을 알 수 있다. 저낙차 터빈의 길이비에 의하여 구성된 발전설비의 운영결과 내부 유동에 있어서 변화폭이 큰 것을 감지하였으며, 이는 전체적

인 수차의 효율을 떨어뜨리는 효과를 가져온 것으로 고려되어 그림과 같이 길이비를 가능한 크게 적용하였다.



(a) Low head turbine



(b) High head turbine

Fig.7.3 The length and width ration of tubular turbine

### 3) 러너 개도의 조절 범위 결정

수차발전기를 설치 운전함에 있어서 유효낙차의 변동보다는 유량의 변동이 발생하는 경우가 많다. 또한 시험설비가 아닌 상업용 급·배수 설비에 있어서 날개의 열림 각도를 조절하기 위한 제어신호는 압력이나 회전수를 제외한 값은 없으며, 특히 계통에 연결되어 발전을 수행하는 경우 압력 신호를 바탕으로 날개의 개도를 조절해야 한다. 통상 압력의 변동에 따른 수차 날개의 열림 개도 조절은 1도를 기준으로 서보모터의 회전수에 따라서 제어를 통하여 조절되도록 구성하였다. 압력 변동폭에 대하여 서보모터의 반응 민감도를 떨어뜨려 동일한 개도로 광범위한 영역을 담당할 수 있게 제어하는 것이 수차발전기의 수명이나 개보수에 드는 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 특히 압력의 변화에 따른 날개의 열림각도 제어시 유량의 변동을 동반하게 되므로 제어시스템의 구축시 반드시 고려되어야 한다.





## 제8장 결론

2009년 이전까지 러너지변형 튜블러 수차는 국내에 그 적용 사례가 없었으며, 설계에 적용하여 운전을 수행한 경험도 없었다. 하지만 본 연구에서 살펴본 바와 같이 2009년이후 설치된 소수력 발전소의 튜블러 수차는 그 활용범위가 매우 넓으며, 유량의 변동에 대한 대응이 뛰어난 장점을 가진 수차발전시스템으로 확인되었다. 연구 과정에 나타난 바와 같이 본 기술의 국산화를 위하여 3년간의 개발기간을 거쳐 상업화를 완성하였다. 이는 국내에서 이루어지고 있는 신재생에너지 확보를 위한 정부나 공공기관, 관련 기업의 노력에 대하여 매우 가치있는 의미를 부여할 뿐 아니라, 개발사업의 폭을 넓히는 획기적인 사례가 되었다고 볼 수 있다. 특히 설치지점은 모두 마이크로 소수력 발전시스템을 적용하기 위한 적지로 대표적인 곳이라 할 수 있는 양식장의 방류수, 정수장, 폐수처리장으로 나뉘어져 있으므로 본 연구의 결과가 더욱 흥미롭다고 할 수 있을 것이다. 지금까지 설명한 소수력발전용 튜블러 수차의 고성능화 및 현장 최적화에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 튜블러 수차의 저낙차 사용조건으로 최소1.5m로 산정하여도 무방하며, 양식장이나 발전소등의 해안 방류수에 적용할 경우 해수면이 조수간만의 차에 따라 변화하는 양을 감안하여 러너지 개도를 조절 할 경우 24시간 연속운전이 가능하다.
- (2) 튜블러 수차의 고낙차 사용조건으로 최대 20m로 산정하여도 운영상의 문제점은 발견되지 않았으며, 필요시 직렬연결을 통한 유효낙차의 배분이 가능하므로 사용 영역의 확대가 가능하다.
- (3) 본 연구를 통하여 고낙차, 중낙차, 저낙차 설계 및 실험을 통하여 소수력 발전용 튜블러 수차를 5가지 대표 사양으로 구분하여 사용영역을 표준화 및 단순화함으로써 원가절감을 통한 사업성 확보의 계기를 마련하였다.
- (4) 특히, 소수력 발전소 건설을 위한 지점의 조건이 표준 범위를 벗어난 경우에는 수차의 조합을 통하여 지점의 특성에 가장 합리적으로 운영할 수 있



는 조건을 산출할 수 있음을 직접 확인하였다.

- (5) 소수력발전용 튜블러 수차의 고성능화 및 현장 최적화를 통하여 상업화에 대한 기초 자료를 확보함으로써 소수력 시장의 활성화는 물론, 미개발 부존자원의 실용화를 위한 다양한 방법을 알리는 계기가 되었다.
- (6) 튜블러 터빈은 유효낙차 1.5 ~20m, 사용유량  $2.5\text{m}^3/\text{sec}$  이내의 범위에서 사용이 가능하며, 5종의 수차형식을 표준화하여 모든 조건에 대한 대응이 가능하도록 하였을 뿐 아니라 필요시 직렬 및 병렬 운전을 통하여 사용영역의 확장이 가능함을 확인하였다.
- (7) 본 연구의 최종 결과로 Fig.8.1과 같이 소수력발전용 튜블러 수차의 선정도를 완성하였으며, 향후 수차발전소의 건설에 있어서 저렴한 비용으로 넓은 범위의 입력조건을 최상의 조건으로 운영할 수 있는 튜블러 수차를 공급할 수 있게 되었다.



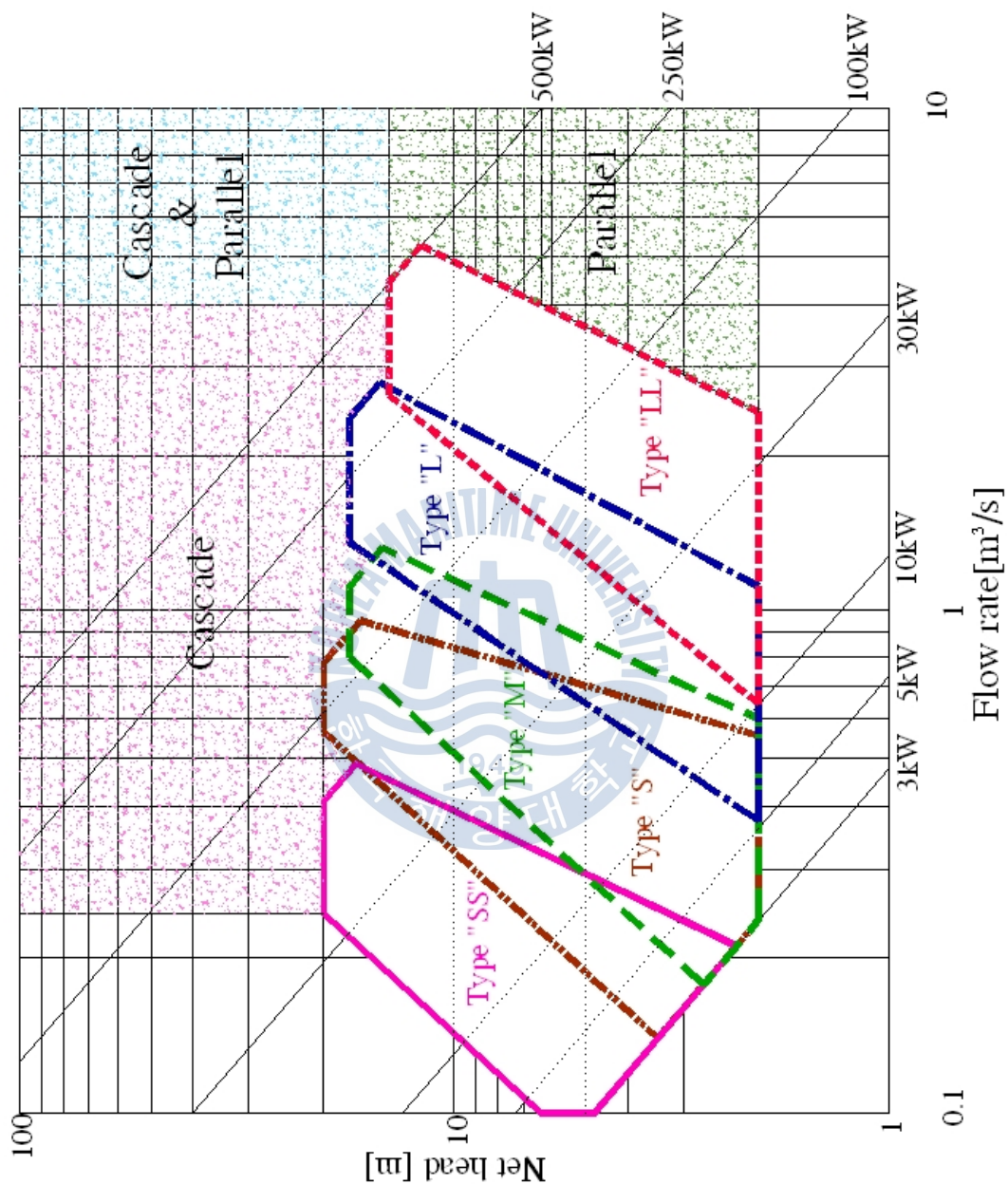







Fig.8.1 Seletcion table for tubular turbine

Table 8.1 Seletcion table for tubular turbine

|           | Runner dia. | Applicable head | Applicable output | Table color   |
|-----------|-------------|-----------------|-------------------|---|
| "SS" Type | 290mm       | 2 to 20m        | 70kW max.         |  |
| "S" Type  | 390mm       | 2 to 20m        | 130kW max.        |  |
| "M" Type  | 500mm       | 2 to 18m        | 170kW max.        |  |
| "L" Type  | 700mm       | 2 to 18m        | 350kW max.        |  |
| "LL" Type | 1000mm      | 2 to 15m        | 500kW max.        |  |



## 참고문헌

- [1] 이경배, “소수력발전 기술개발 현황과 전망”, 2005년도 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 735~741, 2005.
- [2] 김경엽, “수도관로 소수력개발에 따른 최적시스템 적용 및 운영방안”에 관한 연구용역 최종보고서, 2005.
- [3] 지식경제부, 에너지 관리공단, 신재생에너지 RD&D 전략 2030 소수력, 2007.
- [4] 나동훈, “구미하수처리장 방류구에서의 소수력 발전설치 타당성 평가에 관한 연구”, 박사학위논문, 2010.
- [5] 선승표, “기후변화에 따른 소수력 발전량의 변동성에 관한 연구”, 석사학위논문, 2012.
- [6] 송광석, “농업용 저수지의 소수력 부존량 조사”, 석사학위논문, 2004.
- [7] 조건영, “발전소 해수 방수로 조류식 발전시스템에 관한 연구”, 석사학위논문, 2012.
- [8] 정진경, “배수로 수위조절을 통한 소수력 성능개선”, 석사학위논문, 2010.
- [9] 윤창선, “내부모델원리(Internal Model Principle)를 이용한 소수력터빈 안정화”, 석사학위논문, 2011.
- [10] 김길호, “소수력 개발을 위한 타당성 분석 방안”, 석사학위논문, 2008.
- [11] 백남철, “소수력 발전용 수문형 수차 형상 최적화 연구”, 석사학위논문, 2011.
- [12] 우재열, “소수력 발전을 위한 농업용 저수지의 적지 선정 평가”, 석사학위논문, 2011.
- [13] 이경배, “소수력 수차발전기의 선정과 무인화 운영기술”, 석사학위논문, 2005.
- [14] 허준호, “소수력 자원량 산정과 지리정보시스템 구축”, 석사학위논문, 2010.
- [15] 황영호, “소수력용 튜블러 수차의 최적설계 및 성능특성에 관한 연구” 석

사학위논문, 2009.

- [16] 홍정조, “수도관로 소수력발전설비 운영효율 향상을 위한 최적제어방안”, 석사학위논문, 2008.
- [17] 조은주, “신천하수종말처리장에 도입한 소수력 발전소의 경제성 분석에 관한 연구”, 석사학위논문, 2007.
- [18] 이승엽, “실험 및 CFD에 의한 마이크로급 횡류 및 튜블러수차의 성능특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 2010.
- [19] 최혁재, “정수장의 유입원수 낙차를 이용한 소수력 발전”, 석사학위논문, 2010.
- [20] 김인수, “직결형 소수력 발전기 출력 증대를 위한 최적제어 기법 분석”, 석사학위논문, 2010.
- [21] 김동식, “하수처리장 소수력 발전 경제성 평가에 관한 연구”, 석사학위논문, 2005.
- [22] 이형목, “수도관로 소수력 발전설비의 수격작용으로 인한 고장 대책”, 석사학위논문, 2006.
- [23] 강금석, 김지영, 유무성, “해양소수력 건설에 따른 방류수로의 수위 변화 특성 분석”, 한국해양해양공학회 논문집, pp. 391-404, 2009.
- [24] 황영철, “수도관 차압을 이용한 마이크로 튜블러수차의 최적설계법에 관한 연구”, 석사학위논문, 2009.
- [25] 오형우, “소수력 발전용 수력터빈의 최적설계”, 충주대학교 논문집, pp. 13-17, 2008.
- [26] 김희곤, “소수력 발전시스템의 설계파라미터 분석 및 설계에 관한 연구”, 석사학위논문, 2007.
- [27] 강현준, “소수력 터빈용 복수 기계평면시일의 최적화 설계에 관한 연구”, 석사학위논문, 2006.
- [28] 신흥섭, 박경환, 송인규, “보(洑)를 이용한 ‘저낙차대유량’ 소수력 발전소 건설”, 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 2112-2113, 2011.

- [29] 박완순, 이철형, “소수력발전소의 출력특성 분석”, 한국신재생에너지학회 논문집, pp. 81-85, 2006.
- [30] 이철형, 박완순, “농업용 취수보를 이용한 소수력발전시설 특성 분석”, 한국수자원학회 2011년도 학술발표회, pp. 219, 2011.
- [31] 채지석, 윤이수, 김태호, 김영일, 마범구, 최장규, “자연에너지를 이용한 소수력 출력증대 방안 연구”, 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1129-1130, 2011.
- [32] 정필승, 서수상, 민훈진, 김창범, “군위댐 소수력발전기 시공 및 운영개선 사례”, 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1144-1145, 2011.
- [33] 신도선, 김영국, 최홍열, 장정호, “Spring water를 이용한 소수력 개발”, 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1142-1143, 2009.
- [34] 한국과학기술기획평가원, “소수력발전의 국내외 현황과 활성화 방안”, 그린테크리서치 2011-11, 2011.
- [35] Tadashi Tsukamoto, Morihito Inagaki, Tadahiko Watanabe, Shoichi Yamato, Michihiro Nishi, "Characteristics of a Micro Tubular Turbine for the Serial Arrangement", Turbomachinery Vol.32, No.3, pp.176-182, Aug.12, 2005.
- [36] Arno G., Robin S., and Domink S., "Kaplan Turbine Runner Optimization by Numerical Flow Simulation (CFD) and Evolutionary Algorithm", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [37] Torbjorn K.N., Jorgen R., and Ole G. D., "Propeller Turbine with Two Contra-Rotating impellers and built in Generators", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [38] Daisuke T., and Toshiaki K., "Experimental Study on Design Materials for Solidity of Counter Rotating Runners", Proceedings of

the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems  
Yokohama, Japan, October 2006.

- [39] Ales s., and Jiri O., "Shape Optimization of a Kaplan Turbine Blade", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [40] 이원용, “모형 실험에 의한 소수력용 튜블러 수차의 성능해석”, 석사학위 논문, 1985.
- [41] 남상현, 김유탉, 최영도, 남청도, 이영호, “소형 하이드로터빈의 깃수의 영향”, 2007년도 전기학술대회 한국마린엔지니어링학회 논문집, pp. 211~212, 2007.
- [42] 남상현, 김유탉, 최영도, 남청도, 이영호, “러너베인 각도에 따른 튜블러 수차의 속도 및 압력분포”, 2007년도 춘계학술대회 대한기계학회 논문집 pp. 2378~2383, 2007.
- [43] 남상현, 김유탉, 최영도, 남청도, 이영호, “CFD에 의한 소형 튜블러 수차의 캐비테이션 기초해석”, 2007년도 추계학술대회 한국 신재생에너지학회 논문집 pp.408~411, 2007.
- [44] You-Taek Kim, Sang-Hyun Nam, Young-Do Choi, Yeong-Cheol Hwang, Chung-Do Nam, Young-Ho Lee, "Tubular-type Hydroturbine Performance for Variable Guide Vane Opening by CFD", the Fifth International Conference on Fluid mechanics, Shanghai, China pp. 424~427, Aug.15-19, 2007.